

2012

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica
Leganés

Alumna: Qiaoyan Qu

Tutor: Ángel María Bravo Santos



[DESPLIEGUE DE UNA RED LTE EN MADRID]

En el presente proyecto se definen los criterios técnicos de planificación para el despliegue de la red de telefonía móvil LTE, que dotará de cobertura a las principales ciudades.

ÍNDICE

1	Introducción	9
2	Objeto de proyecto	10
2.1	Las lecciones aprendidas de 3G	10
2.2	Modulaciones LTE.....	11
2.3	Requerimientos LTE definido por ITU.....	13
3	Antecedente de la red LTE	15
3.1	Funcionamiento general de la red móvil	15
3.2	Evolución de la red telefonía móvil	16
3.3	UMTS	18
3.3.1	Núcleo de la red.....	20
3.3.2	Red de acceso radio.....	21
4	Elementos del sistema LTE.....	24
4.1	Comparativa entre E-UTRAN y UTRAN	28
4.2	Núcleo de red: EPC	29
4.3	Técnicas de multi-antenas en LTE.....	30
4.4	Capa física	32
4.4.1	Estructura de trama genérica	34
4.4.2	Capa física LTE para la transmisión DL	34
4.4.2.1	Parámetros de modulación DL.....	34
4.4.2.2	Recursos físicos de DL	36
4.4.2.3	Procesamiento de la capa física de DL	38
4.4.3	Capa física LTE para la transmisión UL.....	39
4.4.3.1	Parámetros de modulación UL.....	39
4.4.3.2	Recursos físicos de UL	39
5	Planificación del sistema LTE.....	42
5.1	Problemas de planificación.....	42
5.2	Modulación y codificación	44
5.3	Modelo de propagación.....	45
5.3.1	Okumura-Hata	45
5.3.2	COST 231	46
6	Despliegue de la red LTE	48
6.1	Resultado experimental del operador.....	48
6.1.1	Drive Test	48
6.1.2	Antenas.....	50
6.1.3	Condición de medidas	53
6.2	Resultado teórico	56
6.3	Comparación valores experimentales y teóricos	71
6.4	Diseño de red	73

7 Conclusiones y líneas futuras	77
7.1 Conclusiones	77
7.2 Líneas futuras.....	78
8 Presupuesto	79
9 Bibliografía	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de SC-FDMA y OFDMA	12
Figura 2. Flujo de una comunicación móvil.....	15
Figura 3. Redes móviles	16
Figura 4. Esquema de plan de frecuencia de una red celular	17
Figura 5. Familia de IMT-2000	19
Figura 6. Red UMTS	20
Figura 7. Arquitectura de UTRAN	22
Figura 8. Concepto de DS-CDMA.....	23
Figura 9. Evolución hacia 4G	24
Figura 10. Arquitectura completa de los protocolos de LTE	25
Figura 11. Elementos de red de EPS.....	26
Figura 12. LTE/SAE arquitectura de protocolos simplificada.....	27
Figura 13. Comparativa de la arquitectura de E-UTRAN y UTRAN	28
Figura 14. Elementos de EPC y sus funciones.....	30
Figura 15. Funcionamiento de MIMO	31
Figura 16. Señales físicas en el enlace descendente.....	33
Figura 17. Estructura de la trama genérica para DL y UL de LTE	34
Figura 18. Parámetros de modulación DL	35
Figura 19. Parámetros de recursos físicos	36
Figura 20. Recursos físicos de DL.....	37
Figura 21. Procesamiento del canal físico	38
Figura 22. Parámetros de modulación UL	39
Figura 23. Recursos físicos de UL	40
Figura 24. Parámetros de QoS	42
Figura 25. Ejemplo de la evolución experimentada a largo de un mes .	43
Figura 26. KPIs significativos del test	44

Figura 27. Tabla de modulación y codificación en función de la SINR ...	45
Figura 28. Equipos de medición de cobertura—drive test	49
Figura 29. Señalización LTE sin datos útiles	49
Figura 30. Especificaciones generales	50
Figura 31. Especificaciones	51
Figura 32. Diagramas de polarización según el rango de frecuencia.....	52
Figura 33. Datos de Drive Test: RSRP versus Distancia	53
Figura 34. Representación valores RSRP de un recorrido Drive Test	54
Figura 35. Relación entre SINR y SNR variando el valor de	55
Figura 36. Resultado experimental de SINR versus distancia.....	56
Figura 37. Gráfica resultado experimental de SINR versus distancia	56
Figura 38. Detalle de la ubicación del contenido del canal PDCCH, considerando que ocupa sólo dos símbolos OFDMA.....	57
Figura 39. Cálculo teórico: RSRP versus Distancia.....	58
Figura 40. Ruta de medida del clúster determinado	59
Figura 41. Gráfica de RSRP versus Distancia	59
Figura 42. Espectro de la señal OFDM.....	60
Figura 43. Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release.....	62
Figura 44. Partial FFR.....	63
Figura 45. Soft FFR	63
Figura 46. FFR con sectorización en la sub-banda exterior.	64
Figura 47. Parámetros de la capa física para el sentido DL para distintas canalizaciones.	65
Figura 48. Throughput para diferentes canales	66
Figura 49. Throughput al borde de la ciudad (DL) vs Distancia.....	66
Figura 50. Sistema tri-sectorial	67
Figura 51. Recorrido de DT para medir el throughput	68

Figura 52. Throughput de centro de la ciudad versus Distancia	69
Figura 53. Presentación del throughput en una ruta en el centro de la ciudad	70
Figura 54. Comparación RSRP experimentos y RSRP teóricos.....	72
Figura 55. Comparación SINR experimentos y SINR teóricos	73
Figura 56. Parámetros de QoS calculados para el centro de la ciudad..	74
Figura 57. Parámetros de QoS calculados para el borde de la ciudad ..	75
Figura 58. Despliegue de red celular LTE en Madrid.....	76
Figura 59. Coste de implementación LTE	80

ACRONIMOS

A

AMC: Adaptive Modulation and Coding
ARQ: Automatic Repeat reQuest
AWS: Advanced Wireless Services
ACK/NAK: Acknowledged/Not Acknowledged
ADLS: Asymmetric digital Subscriber Line

B

BCCH: Broadcast Control Channel
BCH: Broadcast Channel
BER: Bit Error Rate

C

CDMA: Code Division Multiple Access
CN: Core Network (núcleo de red)
CS: Dominio de servicio de conmutación de circuito

D

DS-CDMA: Direct Sequence - Code Division Multiple Access
DCI: Downlink Control Information
DFT: Discrete Fourier Transform
DCR: Direct Conversion Receiver
DRX: Discontinuous Reception
DAC/RF: Digital to Analog Converter / Radio Frequency

E

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EPS: Evolved Packet System
E-UTRAN: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EPC: Evolved Packet Core

F

FDM: Frequency Division Multiplexing
FDD: Frequency Division Duplexing
FEC: Forward Error Correction

G

GSM: Global System for Mobile communication
GPRS: General Packet Radio Service
GGSN: Gateway GPRS Support Node
GW: GateWay

H

HARQ: Hybrid ARQ
HO: Handover
HSPA+: High Speed Packet Access
HSS: Home Subscriber Server

I

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform
ITU: International Telecommunication Unit
IMT-2000: International Mobile Telecommunication-2000
IMT-DS: Direct Sequence
IMT-MC: Multicarrier
IMT-TC: Time Code
IMT-SC: Single Carrier
IMT-FT: Frequency Time
ICI: Inter-carrier Interference
ICIC: Inter-cell Interference Control
IP: Internet Protocol

L

LTE: Long Term Evolution

M

MSC: Mobile services Switching Center
MIMO: Multiple Input Multiple Output
MAC: Medium Access Control
MME: Mobility Management Entity. The key control node for the LTE access network

N

NAS: Non Access Stratum
NAT: Network Address Table

O

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P

PAPR: Peak to Average Power Ratio
PCI: Physical Cell Identity
PDCCH: Physical Downlink Control Channel
PCRF: Policy and Charging Rules Function/The Bridgewater Policy Controller
PDCCP: Packet Data Convergence Protocol
PS: Dominio de servicio de conmutación de paquete
PDN: Packet Data Network
P-GW: Packet Data Network Gateway

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

R

RAN: Radio Access Network

RNC: Radio Network Controller. Control de la Red Radio

RNS: Radio Network System. Subsistema de red de radio

RLC: Radio Link Control

RRU: Remote Radio Unit

S

SGSN: Serving GPRS Support Node

SAE: Service Architecture Evolution, the core network for LTE

S-GW: Serving Gateway

SC-FDMA: Single Carrier-Frequency Division Multiple

T

TDD: Time Division Duplexing

TLS: Transport Layer Security

TBF: Temporary Block Flow

U

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System

UE: Equipo de Usuario

UPE: User Plan Entity

UTRAN: UMTS Terrestrial RAN

W

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

WLAN: Wireless Local Area Network

Otros

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

1 INTRODUCCIÓN

La telefonía móvil es ya la tecnología de mayor éxito de la historia de las telecomunicaciones, su desarrollo ha sido de tal magnitud que incluso se han alcanzado niveles de saturación en los principales mercados mundiales (Wireless intelligence, 2007) [1]. Paralelamente a esta progresiva penetración mundial se ha producido una evolución tecnológica de los sistemas, aunque de menor dinamismo que la primera.

Los usuarios del mundo de las telecomunicaciones exigen una mayor calidad en las llamadas, amplia y mejor cobertura de los proveedores de servicio móvil y mejores servicios tales como vídeo llamadas y aplicaciones que requieren una alta velocidad. Por otro lado, los operadores de telefonía móvil buscan optimizar su red para poder cumplir con todas estas exigencias.

La estandarización de LTE (Long Term Evolution) es el 3GPP [2] (3rd Generation Partnership Project) ha llegado ya a un estado maduro, donde los cambios de la especificación están limitados a correcciones y solución de fallos. Los sistemas de comunicaciones móviles LTE están desplegados en las principales ciudades, y adelante como una evolución natural de GSM (Global System for Mobile communications) y UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Desde la perspectiva de un usuario de un sistema de comunicaciones móviles, éste contrata el acceso a una serie de servicios, con capacidad de movilidad y sobre una cierta extensión geográfica, a lo que asocia un cierto nivel de calidad a nivel cualitativo y cuantitativo. Para soportar servicios y aplicaciones avanzadas, el requerimiento de la velocidad binaria se ha incrementado a 100Mbps para alta movilidad, y 1Gbps para baja movilidad.

El presente proyecto, algunos términos se pertenecen en inglés, por que no es ideal traducirlos en español.

2 OBJETO DE PROYECTO

El objeto del presente proyecto se definen los criterios técnicos de planificación para el despliegue de la red de telefonía móvil LTE, que dotará de cobertura a las principales ciudades.

Se consiste en diseñar y analizar la red de cuarta generación, basado en las medidas experimentales obtenidas a partir de la medición de campo utilizando un vehículo (Drive Test), tras estudio de los datos y despliegue de la red LTE en el termino Madrid Centro, gestionar la calidad de servicio, comparamos los resultados con la teoría de Okumura-Hata, para realizar todo este trabajo en su totalidad.

Los criterios para la planificación del emplazamiento son los siguientes:

- Umbrales de medidas
- Estación base y antenas
- Selección de la antena de cobertura

Dado que la lista de objetivos ha sido realizada utilizando los cálculos teóricos de cobertura a partir de los emplazamientos existentes que es necesario realizar esta comprobación previa para poder comenzar los trabajos de planificación de una nueva obra.

2.1 Las lecciones aprendidas de 3G

En primer lugar, la elevada complejidad de núcleo de red en 3G en los equipos, los protocolos y la señalización, lo que se traduce en coste y latencia altos. En segundo lugar, uso poco eficiente de anchura de banda, se ocupan 5MHz cualquiera que sea la tasa binaria. Y la prevalencia inicial de CS (dominio de servicio de conmutación de circuitos), aunque en 3,5G ya se da protagonismo a PS (dominio de servicio de conmutación de paquetes).

A parte de los puntos débiles, también fijamos a los puntos fuertes de la red 3G: como buen desempeño (performance) de los turbos códigos, ventajas notorias de la planificación (Scheduling), buena respuesta de la técnica AMC (Adaptive Modulation and Coding). Ventajas de la técnica ARQ (Automatic Repeat reQuest) inteligente: HARQ (Hybrid ARQ).

Además de incorporar esas características de HSPA+ (High Speed Packet Access), en LTE se “exprime” al máximo la tecnología radio, por ello, se utiliza nuevas técnicas de modulación y multi-acceso: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) y SC-FDMA (Single Carrier-Frequency

Division Multiple), y se emplea la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) para aprovechar la propagación multi-trayecto.

La multiplexación por división de frecuencia (FDM) es un tipo de multiplexación en donde varias señales en banda base son moduladas en diferentes frecuencias de sub-portadoras que conformarán una única señal. La multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) está basado en FDM y utiliza sub-portadoras ortogonales para transmitir datos, tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión. Es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias RF (Radio Frequency).

2.2 Modulaciones LTE

Lo novedoso de LTE es la interfaz radioeléctrica basada en OFDMA para el enlace descendente (DL) y SC-FDMA para el enlace ascendente (UL). OFDMA es una extensión de OFDM [11].

Modulación OFDMA

Las sub-portadoras son asignadas dinámicamente a usuarios en diferentes time-slots. Al igual que OFDM, tiene la ventaja de que un usuario puede transmitir y recibir en una trama de tiempo entera, pero reduce el PAPR (Peak to Average Power Ratio) distribuyendo el ancho de banda total a varias estaciones móviles usando poca potencia de transmisión.

Modulación SC-FDMA

SC-FDMA es también una extensión de OFDM. Esta técnica reduce el PAPR de manera significativa en comparación con OFDMA, transmitiendo en sub-portadoras en secuencia y no en paralelo, como en OFDMA. En la figura 1, podemos ver que a diferencia de OFDMA, el SC-FDMA se está agregando bloques adicionales de DFT (Discrete Fourier Transform) e IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) en transmisión y recepción. Pero debido a las similitudes con OFDMA, la parametrización de LTE en el DL y UL pueden ser armonizadas. La técnica eficaz de reducción de PAPR debe dar mejor equilibrio entre la capacidad de reducción de PAPR y la potencia de transmisión, la pérdida de tasa, el BER (Bit Error Ratio), etc.

De la figura 1, consideramos que:

$N < M$

S-P: serie a paralelo y P-S paralelo a serie

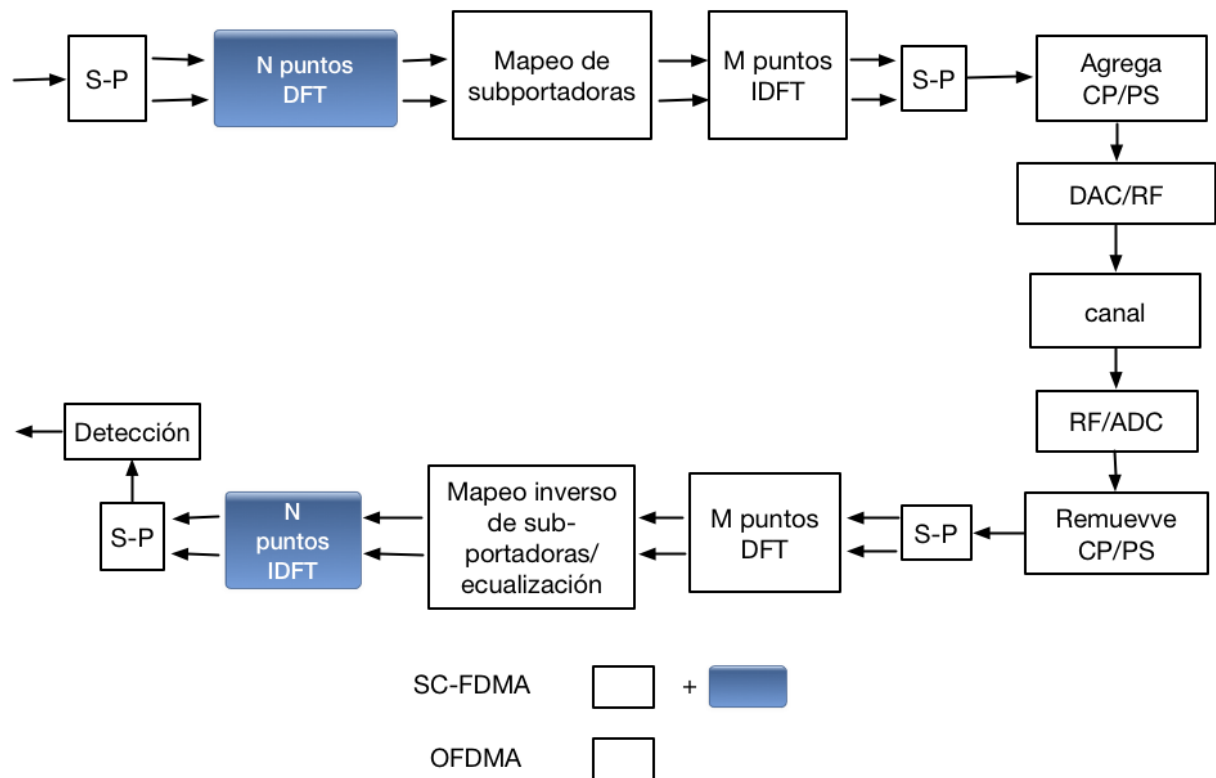


Figura 1. Estructura de SC-FDMA y OFDMA

La modulación elegida por el estándar 3GPP hace que las diferentes tecnologías de antenas (MIMO) tengan una mayor facilidad de implementación; esto favorece, según el medio, hasta cuatro veces la capacidad de transmisión de datos.

El detonante para que el 3GPP comenzase a trabajar en el desarrollo de LTE fue reconocer la necesidad de dar respuesta a la demanda en banda ancha móvil, mejorando el servicio prestado hasta el momento y reduciendo el coste por bit.

2.3 Requerimientos LTE definido por ITU

Tasa binaria de pico

El sistema debe tener una tasa binaria objetivo en DL de 1 Gbps y una tasa binaria de pico en UL de 500 Mbps en caso de utilizar antenas 4x4.

Latencia

Plano de control: el objetivo de tiempo de transición desde modo idl (con dirección IP asignada) a modo conectado debe ser menos de 50 ms, incluyendo el establecimiento del plano de usuario (excluyendo el retardo de transferencia del interfaz S1). El objetivo para la transición desde un estado dormido a un modo conectado, DRX (Discontinuous Reception), es decir, substrato de recepción discontinuo en modo conectado, debe ser menos de 10 ms (excluyendo el retardo de DRX).

Plano de usuario: Tiempo tránsito unidireccional entre el instante en que un paquete está disponible en la capa IP del nodo UE (equipo de usuario) y el instante en que lo está en el nodo frontera RAN (red de acceso de radio). La latencia será inferior a 5 ms en condición descargada: un único usuario y un solo flujo de datos, para un paquete IP mínimo: Cabecera IP + carga útil de 0 bytes.

Eficiencia espectral

LTE tiene como objetivo soportar en el canal descendente, con una configuración de antena 8x8, una eficiencia espectral de pico de 30 bps/Hz y en ascendente, configuración de antena 4x4, una eficiencia espectral de pico de 15 bps/Hz. Adicionalmente se han fijado objetivos de eficiencia espectral media, esta eficiencia espectral media se define como la agregación del throughput de todos los usuarios (el número de bits recibidos correctamente en un periodo concreto de tiempo) normalizado por el ancho de banda de las celdas dividido por el número de celdas.

Throughput de usuario en el borde de la célula

LTE debe permitir que el throughput de usuario en el borde de la célula sea el más alto posible. El throughput de usuario en el borde de la célula se define como el punto del 5% de la función acumulativa de densidad del throughput de usuario normalizado por el ancho de banda total de la célula. Que permite una velocidad de 20Mbps para UL y 100Mbps para DL.

Movilidad

Los requerimientos de movilidad han sido reformulados respecto a los de LTE release 8. El sistema debe soportar movilidad a lo largo de la red celular para varias velocidades hasta 350 km/h (o hasta 500 Km/h dependiendo de la banda de frecuencia). E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) estará optimizada por velocidades de vehículos reducidas, de 0-15km/h, con buena calidad, entre 15 y 120 km/h.

Cobertura

Los objetivos básicos deben alcanzarse en células de hasta 5km de radio; con ligera degradación, hasta 30km de radio.

Flexibilidad espectral

Las bandas de frecuencia identificadas aparte de las ya fijadas en LTE release 8 son las siguientes:

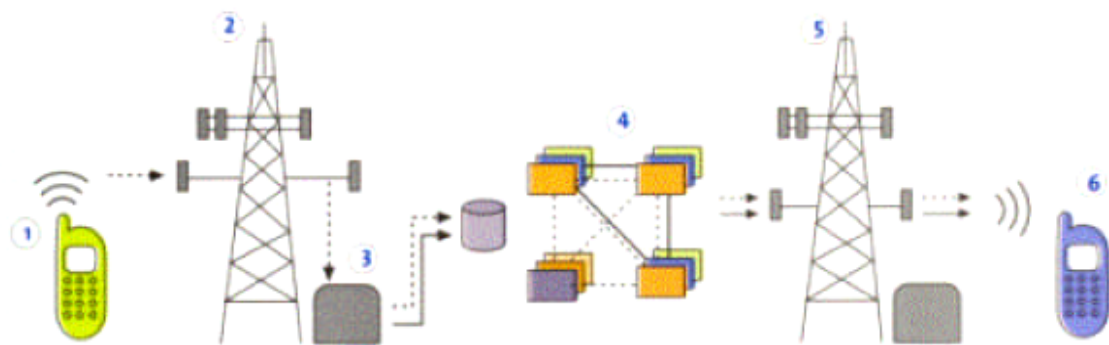
- Banda 450-470 MHz
- Banda 698-862 MHz
- Banda 790-862 MHz
- Banda 2,3-2,4 GHz
- Banda 3,4-4,2 GHz
- Banda 4,4-4,99 GHz

LTE puede operar en espectros de diferentes tamaños, incluyendo espacios espectrales más grandes que aquellos definidos en LTE release 8. El principal objetivo para soluciones más anchas que 20 MHz debe ser en espectro consecutivo. Aun así, la agregación de espectro para LTE debe tener en cuenta una complejidad de UE razonable. Se debe soportar tanto FDD (Frequency Division Duplexing) como TDD (Time Division Duplexing) para bandas emparejadas y sin emparejar, respectivamente.

3 ANTECEDENTE DE LA RED LTE

3.1 Funcionamiento general de la red móvil

Los elementos que intervienen en una llamada efectuada a través de un móvil pueden verse en el gráfico adjunto:



..... Tráfico: información transmitida y recibida por los usuarios, tanto de voz como de datos

___ Señalización: procedimientos de establecimiento de la comunicación previo al inicio de intercambio de tráfico

Figura 2. Flujo de una comunicación móvil.

Los pasos que se llevan a cabo son:

1. Llamada. El usuario realiza una llamada que interceptan las antenas receptoras.
2. y 3. Antenas y estación base. Las antenas envían la información a las estaciones base o las transforman para mandarla a los centros de conmutación.
4. Nodos de conmutación. Los nodos de conmutación reciben todas las informaciones, las ordenan y las envían según donde se encuentre el destinatario: a la red fija (con lo que se acaba el trayecto de la llamada en la red móvil) o dentro de la red móvil si el destinatario es un móvil.

5. Antenas. Las antenas reciben la información y la transmiten en la zona donde se encuentra el usuario.

6. Llamada. El usuario recibe la llamada.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior las instalaciones radioeléctricas constituyen un elemento imprescindible de la red móvil a la hora de realizar las conexiones.

3.2 Evolución de la red telefonía móvil

En España existen varias tecnologías que se han desarrollado para la red telefonía móvil. Cada uno de los sistemas ha sido regularizado por la administración. Concediendo unas licencias de uso de espacio radioeléctrico limitado por tecnología y siendo dividido una vez más es concesiones realizadas a las operadoras de telefonía móvil [13].

Los recursos en término de uso de espectro radioeléctrico para un operador son muy reducidos, siendo necesario el uso de alguna técnica que permita un uso óptimo de las frecuencias disponible. Esta técnica de reutilización de frecuencias se consiste en usar una frecuencia determinada en un área limitada con el fin de que, tomando una distancia suficiente desde lugar que se usó esta frecuencia, se puede utilizar la misma frecuencia sin tener interferencias. A cada una de estas áreas se le denominamos Célula, y los sistemas de telefonía como sistemas celulares.

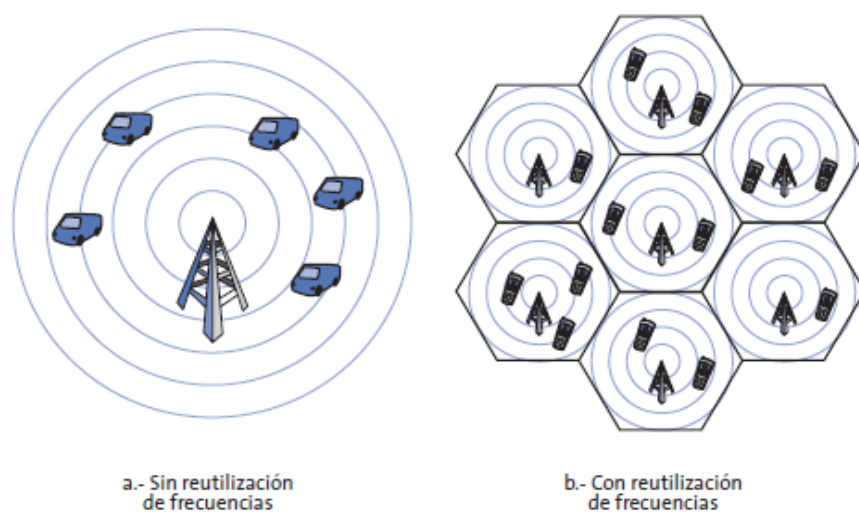


Figura 3. Redes móviles

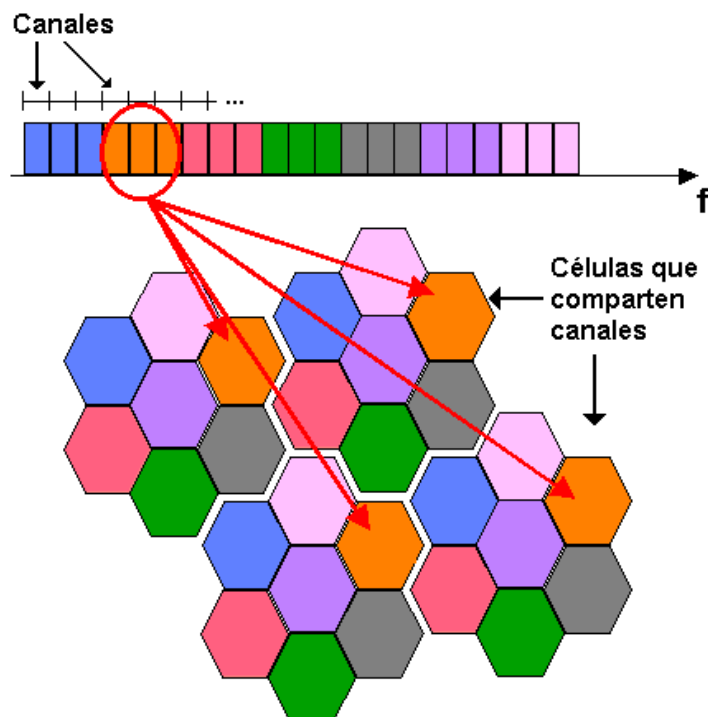


Figura 4. Esquema de plan de frecuencia de una red celular

Como podemos ver en la Figura 4, cada célula permite la realización de un número de llamadas simultáneas limitadas, por lo tanto, el tamaño de las células depende en gran medida de la cantidad de usuarios existentes en cada una de ellas, así pues, una célula de un entorno urbano poseerá un tamaño mucho menor que una célula de un entorno rural.

El sistema celular tiene como objetivo posibilitar la comunicación entre personas. Para lo cual se intercambian señales radioeléctricas entre los terminales de usuario y las estaciones base. La propagación de las señales sufre una pérdida de potencia por las perturbaciones de la naturaleza, y por lo cual es necesario el empleo de antenas para reducir estas pérdidas y ayudarán a focalizar la señal.

3.3 UMTS

La tercera generación de las redes móviles se caracteriza por contener a la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a internet, y es adaptada para aplicaciones multimedia y altas velocidades de la transmisión de datos.

La ITU (International Telecommunication Unit) exige a las redes IMT-2000 (3G) (International Mobile Telecommunications – 2000) [15], que proporcionen una mayor capacidad de sistema y una mayor eficiencia espectral con respecto a los sistemas 2G, que soporten servicios de transmisión de datos con una velocidad mínima de transmisión de 144 kbit/s en entorno móviles (de exterior) y de 2Mbit/s en entorno fijo (en interior).

Basando de estos requisitos, la ITU aprobó en el año 1999 cinco interfaces radio para la familia de IMT-2000, se presenta en la Figura 5:

- IMT-DS (Direct Sequence). Conocido como UTRA FDD (UMTS Terrestrial Radio Access FDD), y más comúnmente como WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access).
- IMT-MC (Multicarrier). Este sistema es la versión 3G del sistema IS-95 (también conocido como CDMAone), y se suele denominar CDMA2000 (Code Division Multiple Access).
- IMT-TC (Time Code). Este sistema es el UTRA TDD. Se trata de modo UTRA que utiliza multiplexación por división en el tiempo.
- IMT-SC (Single Carrier). Se trata de una manifestación particularizada de GSM Fase 2+, conocido como EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution).
- IMT-FT (Frequency Time). Se conoce como división en el tiempo y/o en códigos.

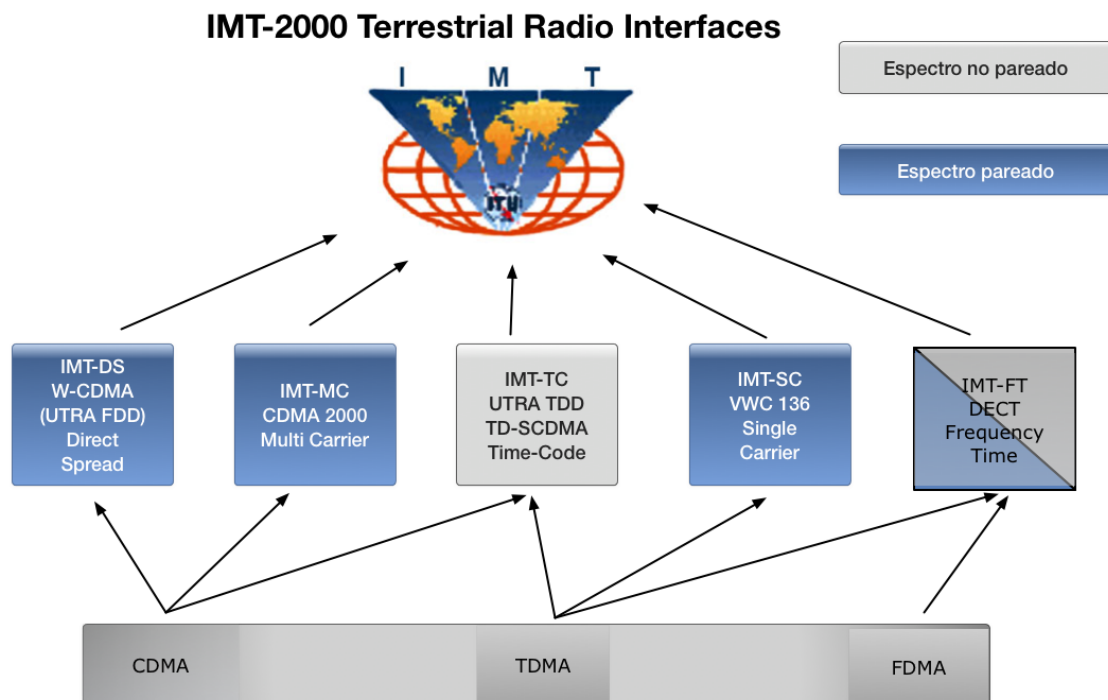


Figura 5. Familia de IMT-2000

Las redes UMTS se compone dos grandes subredes: la red de telecomunicaciones que se encarga de proporcionar la conexión extremo a extremo, y la red de gestión que se realiza la provisión de medios para la facturación y tarificación de los abonados, así como el registro y la definición de los perfiles de servicio, la seguridad y la operación de los elementos de red.

La Figura 6 presenta la red UMTS, la cual se compone de los siguientes elementos:

- El núcleo de red (core network):
- La red de acceso radio (UTRAN).
- Los terminales móviles.

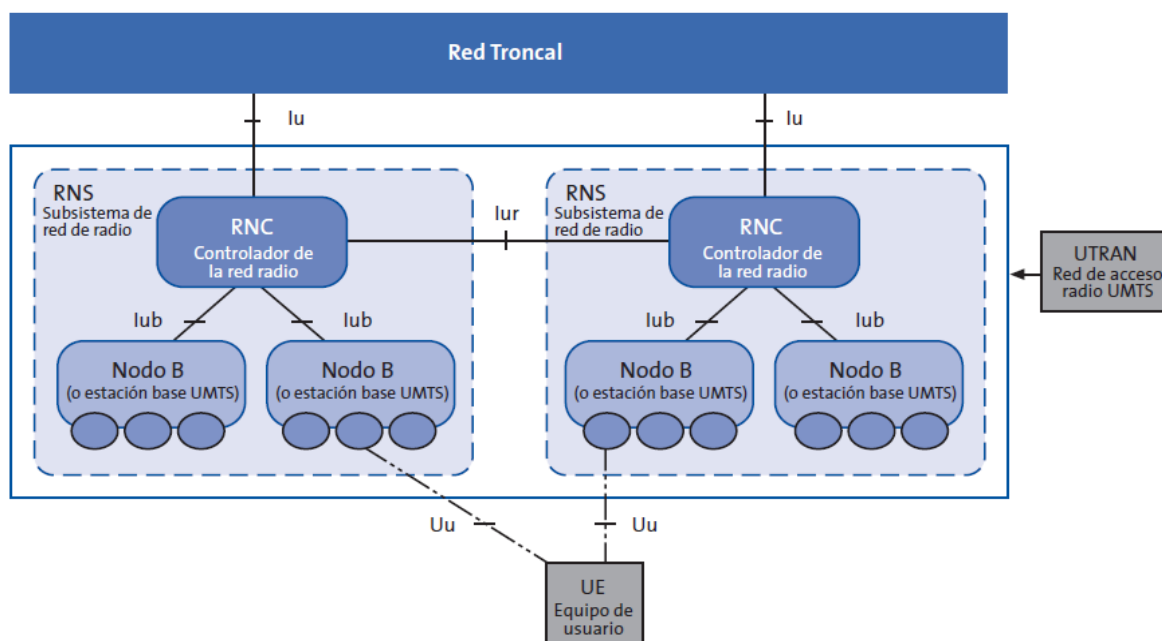


Figura 6. Red UMTS

3.3.1 Núcleo de la red

En UMTS se define un núcleo de red universal, que pueda gestionar distintos tipos de red de acceso radio y conectarse a distintos tipos de redes fijas. Para minimizar los costes y facilitar la evolución, el núcleo de la red de UMTS se divide en dos dominios: el de conmutación de circuitos y el de conmutación de paquetes.

La conmutación de circuitos, que encaminará los tráficos en modo de circuito, se encarga de buscar un camino apropiado para conectar dos usuarios, y se reservan los recursos de transmisión y de conmutación de la red para su uso exclusivo en el circuito durante la conexión. Este tipo de conmutación implica tres fases: el establecimiento del circuito, la transferencia de datos, la desconexión del circuito. El camino se pertenece ocupado en el proceso de transmisión, para poder realizar otra transmisión, se debe finalizar la conexión establecida. Los nodos deben tener capacidad de conmutación y de canal suficiente como para gestionar la conexión solicitada. Los conmutadores deben contar con la inteligencia necesaria para realizar estas reservas y establecer una ruta a través de la red.

La conmutación de circuito tiene siguientes ventajas:

- Ancho de banda está definido y se mantiene constante durante la comunicación;

- El circuito es fijo, no se pierde tiempo en el encaminamiento de la información;
- La transmisión se realiza en tiempo real, siendo útil para la comunicación de voz y vídeo;
- Si existe retardo a la hora de comunicación, el retardo de la transmisión posterior es despreciable, y si el tráfico se realiza entre el mismo par de estaciones, la velocidad de transmisión puede ser alta.

Por otra parte, también tiene su parte de desventajas: retraso en el inicio de la comunicación, y cuando no se utiliza el enlace se desaprovechan recursos; si la comunicación es de ráfagas, o entre una gran variedad de estaciones, es ineficiente; el camino físico es siempre el mismo, por lo que no se utilizan los posibles caminos alternativos que puedan surgir que sean más eficientes.

3.3.2 Red de acceso radio

La red de acceso radio proporciona la conexión entre los terminales móviles y el núcleo de red, también se denomina como UTRAN [15], en la Figura 7 presenta su arquitectura, que se compone un conjunto de sistemas de red radio o RNS (Radio Network System), constituidos a su vez por un controlador radio RNC (Radio Network Controller) que posee y controla los recursos de radio en su dominio (los Nodos Bs se conecta a él); el segundo elemento de UTRAN es una serie de Nodo B (estaciones base) que convierte el flujo de datos entre las interfaces Iub y Uu, también participa la gestión de recursos de radio. El RNC se encarga de controlar a uno o varios Nodos B bajo su cargo [17].

Los elementos funcionales de UTRAN se comunican entre sí a través de:

- *Iu*: La interfaz conecta a la red central con la red de acceso de radio de UMTS. Es la interfaz más importante para el concepto de 3GPP, que se puede conectar a dos diferentes elementos de la red central dependiendo el tipo de conmutación que vamos a utilizar. En caso de conmutación de circuitos, se sirve de enlace entre UTRAN y el MSC, y en el caso de conmutación de paquetes, se encarga de conectar a la red de acceso de radio con el SGSN (Serving GPRS Support Node) de la red central.
- *Iur*: La interfaz entre dos RNCs
- *Iub*: La interfaz entre un RNC y un nodo B
- *Uu*: La interfaz radio o aire entre un Nodo B y un terminal móvil

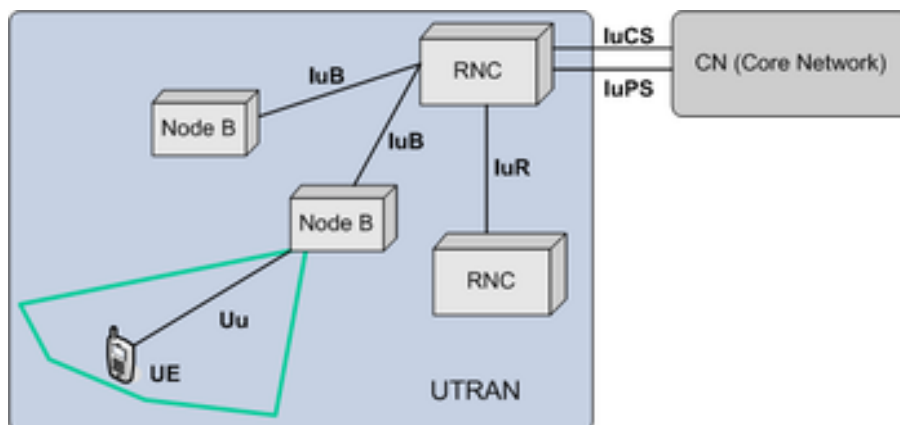


Figura 7. Arquitectura de UTRAN

En Europa se ha adoptado la técnica de acceso múltiple, DS-CDMA (Direct Sequence – Code Division Multiple Access), su concepto está definido en la Figura 8. El acceso múltiple por división de código, los usuarios se distinguen entre sí por unas secuencias de código único para cada uno de ellos, y todos los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo utilizando la misma frecuencia portadora. DS-CDMA va un paso más allá en la tecnología CDMA, se trata de una solución perteneciente a un grupo más extenso de técnicas, conocido como de espectro ensanchado, generado a partir de la señal de banda base, una señal moduladora de un ancho de banda mucho mayor que el de la señal en la banda base, empleando un código de expansión espectral que permite la separación entre diferentes comunicaciones que comparten una misma portadora. Esta operación ofrece una importante ventaja como es la mejora de la inmunidad frente a desvanecimientos selectivos en frecuencia. El ensanchamiento se consigue multiplicando la señal digital en banda base por una secuencia conocida por los dos extremos en la comunicación. Esta operación restaura el ancho de banda de la señal útil en recepción, pero en cambio ensancha la de cualquier señal interferencia de banda estrecha que pudiera recibirse, reduciendo la cantidad de energía de ésta que interfiere con la señal útil.

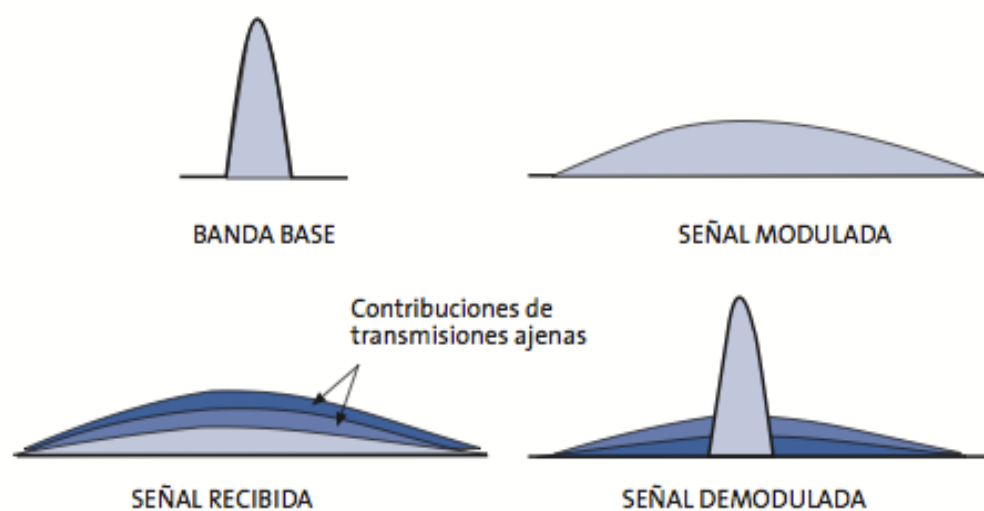


Figura 8. Concepto de DS-SS

4 ELEMENTOS DEL SISTEMA LTE

LTE [18] es un nuevo estándar de la norma 3GPP. Es una evolución de la norma 3GPP UMTS (Figura 9), denominada como UTRAN. Formalmente, la nueva red de acceso recibe el nombre de E-UTRAN (Evolved UTRAN) aunque muchas veces se utiliza también el término LTE en las especificaciones como sinónimo de E-UTRAN, para otros como un nuevo concepto de arquitectura evolutiva (4G). De hecho LTE será la clave para el despliegue del internet móvil. Servicios como la transmisión de datos a más de 300 metros y videos de alta definición, gracias a la tecnología OFDMA serán de uso corriente en la fase madura del sistema.

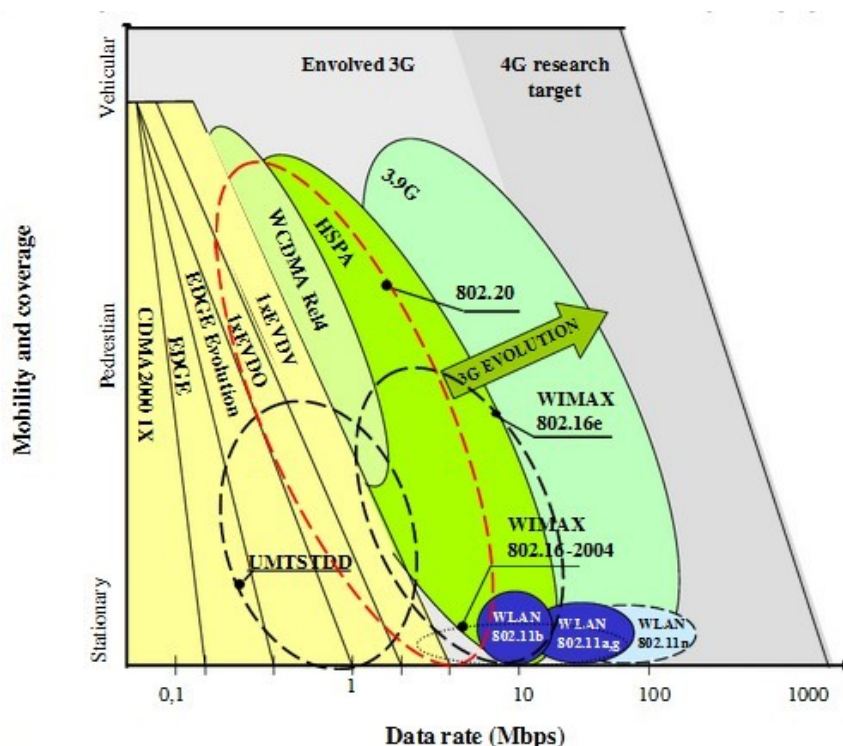


Figura 9. Evolución hacia 4G

La red de acceso radio del sistema LTE está compuesta básicamente por eNBs a través de los cuales se conectan los terminales móviles a la red, utilizando para ello la denominada interfaz aire del sistema.

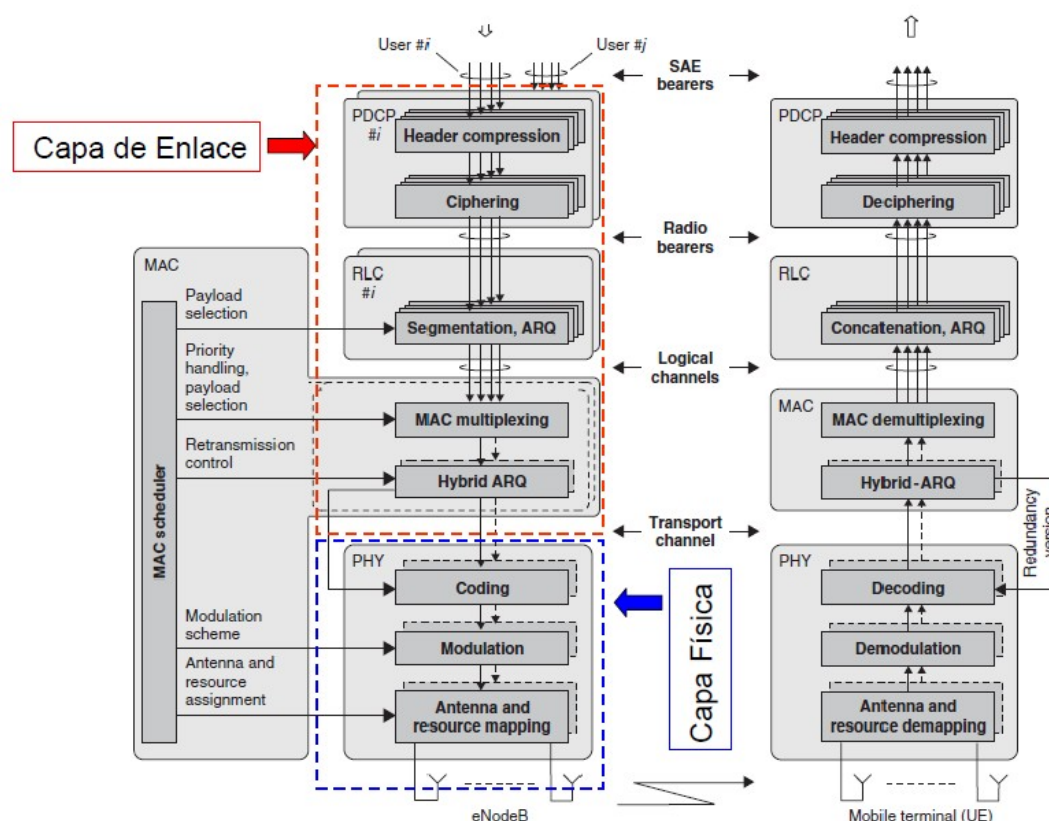


Figura 10. Arquitectura completa de los protocolos de LTE

La figura anterior (Figura 10) demuestra la arquitectura completa de LTE [18], que está compuesta por el núcleo de red y la red de acceso, donde la primera corresponde al EPS (Evolved Packet System) que proviene del SAE (Service Architecture Evolution), mientras que la red de acceso hace referencia a la E-UTRAN. Ambas redes, tanto el núcleo de red como la de acceso, representan la capa de Conectividad del Protocolo de Internet (IP), conforma el sistema evolucionado de paquetes. El EPS conecta a los usuarios a la PDN (Packet Data Convergence Protocol) por medio de la dirección IP para acceder a distintos servicios como Internet y VoIP. Se basa en paquetes, aunque deberá soportar sistemas que admitan tráfico conversacional y en tiempo real. Soportará QoS de extremo a extremo, y facilidades de migración e interfuncionamiento.

El eNB se conecta a la red troncal a través de la interfaz S1 (Figura 11), que en realidad está desdoblada en dos interfaces diferentes: una para conectarse con el nodo encargado de las funciones de control en la red, denominado entidad de gestión de movilidad (Mobility Management Entity o MME), y otro que se encarga de las funciones de transferencia de los paquetes de usuario entre el eNB y en la red troncal a través del denominado Server Gateway (S-GW). Opcionalmente, los eNBs pueden conectarse entre

si mediante la denominada interfaz X2 que permite, entre otras funciones, realizar la transferencia de paquetes de usuario entre eNBs durante el proceso de transferencia de llamada (Handover).

UPE (User Plan Entity): Entidad del plano de usuario, hace la compresión de cabeceras IP, encriptación de datos de usuario, terminación de paquetes del plano-U, y conmutación del plano-U para sustentar la movilidad de los UE.

Mensajes DCI (Downlink Control Information): del eNB al UE sin pasar por MAC (Medium Access Control), van en el PDCCH (Physical Downlink Control Channel), proporcionan información de planificación (UL-DL) y control de potencia. Varios mensajes por subtrama en diferentes PDCCH para uno o más UE.

En la siguiente figura se muestran los elementos de EPS y sus interfaces.

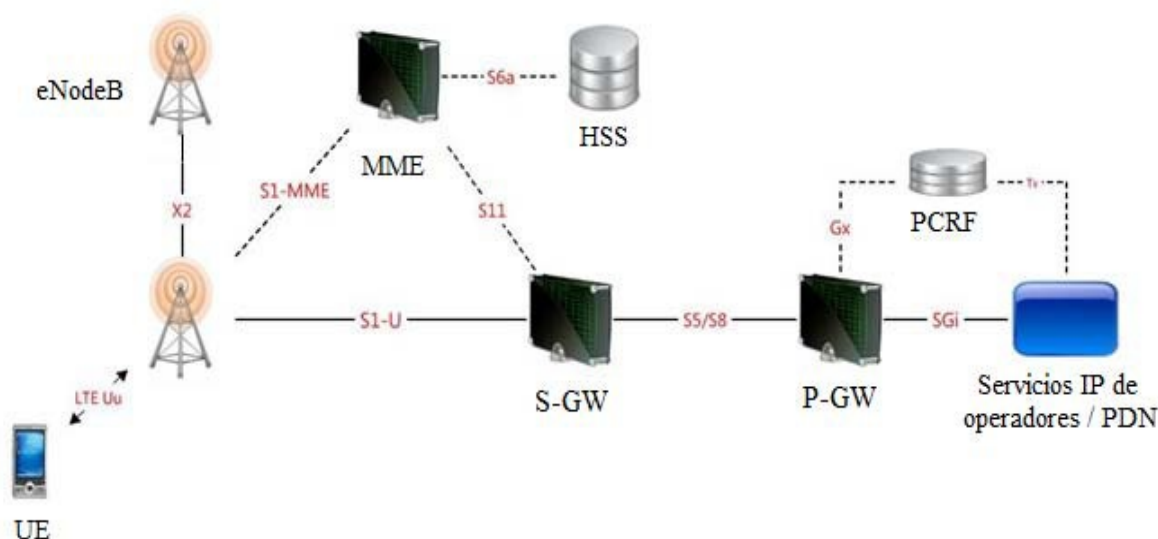


Figura 11. Elementos de red de EPS

- HSS: Home Subscriber Server
- S-GW: Serving Gateway
- P-GW: Packet Data Network Gateway
- PDN: Packet Data Network
- PCRF: Policy and Charging Rules Function

Como es habitual en los equipos de telecomunicación, la estructura de esta torre de protocolos se articula en dos planos (Figura 12):

- El plano de usuario, destinado al envío de la información de usuario (paquetes IP generados por el terminal móvil o destinados a él).

- El plano de control o señalización, destinado a transportar los mensajes de control intercambiados entre la red y el terminal móvil, y que permiten un correcto funcionamiento del sistema.

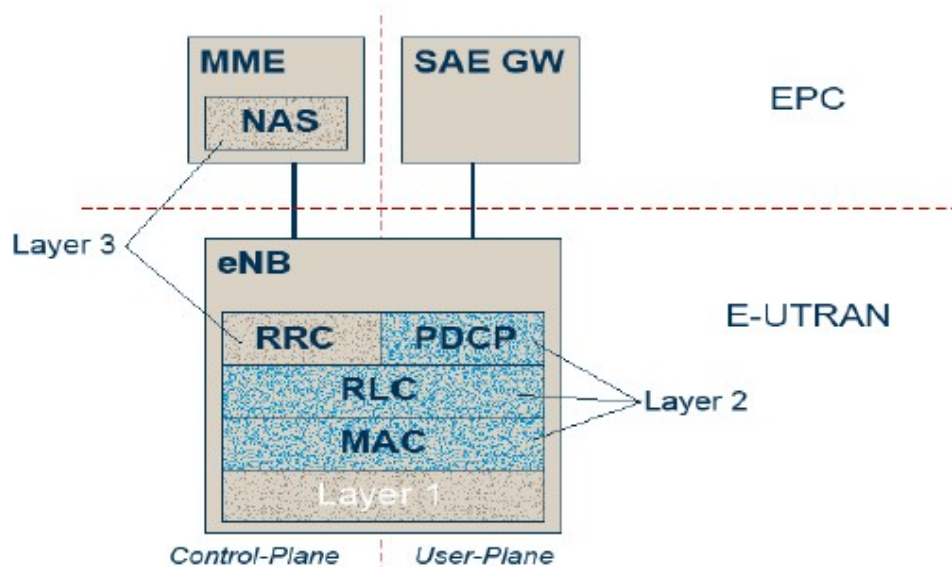


Figura 12. LTE/SAE arquitectura de protocolos simplificada

El plano de control está interconectado al nodo MME, en donde están ubicadas, entre otras, las funcionalidades de gestión de la sesión y la movilidad y los mecanismos de control de las llamadas.

Desde punto de vista de la interfaz aire, el envío de paquetes de usuario mediante dicha interfaz se gestiona en base al establecimiento de los denominados servicios portadores radio (Figura 12), cada servicio tiene asociado un perfil de calidad de servicio que la torre de protocolos que caracteriza a la interfaz debe garantizar.

- PDCP: Packet Data Convergence Protocol. Cuyas principales funciones son: compresión de las cabeceras de los paquetes IP, entrega/recepción ordenada de los paquetes IP desde/hacia las capas superiores, que están ubicadas en el Gateway.
- RLC: Radio Link Control. Que permite establecer un enlace fiable a través de la interfaz aire.
- MAC: Medium Access Control. Que permite un acceso ordenado de los diferentes usuarios al medio de transmisión (espectro radioeléctrico).

Los protocolos PDCP, RLC y MAC se denominan protocolos de capa 2 (Layer 2), o protocolos de la capa de gestión del enlace. Por su parte el protocolo RRC se entiende como un protocolo de la capa 3 (Layer 3) que gestiona funcionalidades a nivel de red. Y la capa física es un protocolo de capa 1 (Layer 1), que proporciona el mecanismo físico de transmisión/recepción a través del espectro radioeléctrico.

4.1 Comparativa entre E-UTRAN y UTRAN

La arquitectura E-UTRAN presenta importantes diferencias con respecto a las redes de acceso UTRAN. En la Figura 14 se muestra, a nivel ilustrativo, un despliegue simple de una red E-UTRAN y de una red UTRAN.

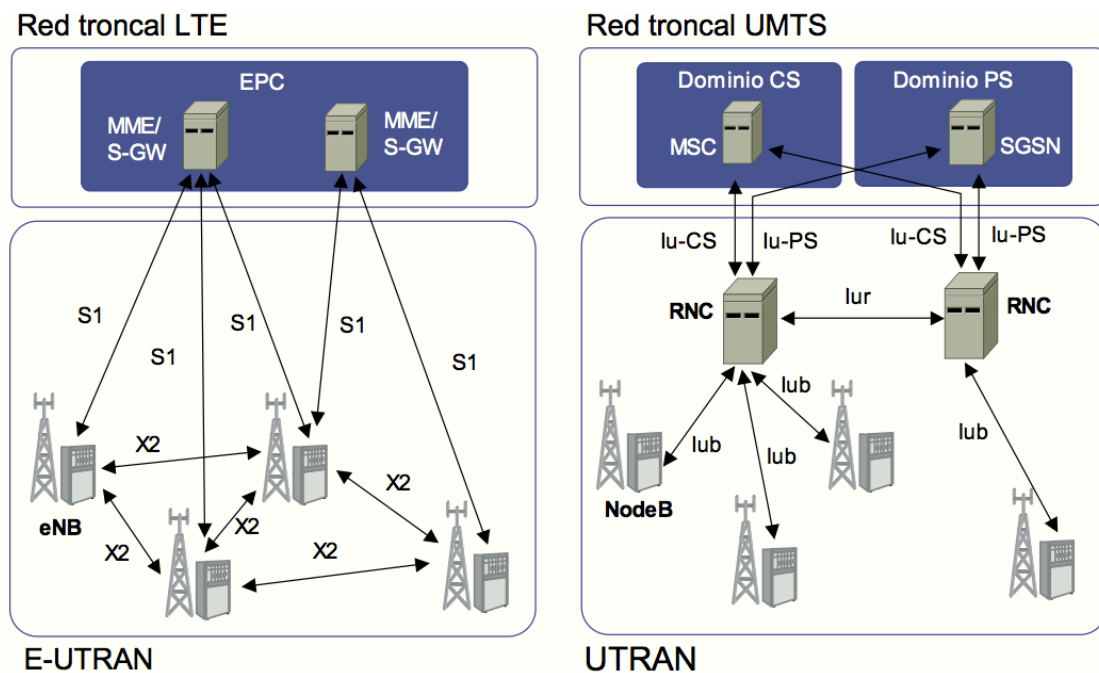


Figura 13. Comparativa de la arquitectura de E-UTRAN y UTRAN

Las redes de acceso anteriores a E-UTRAN se basan en una arquitectura jerárquica donde las funciones de la red de acceso se distribuyen en dos tipos de nodos: estaciones base y equipos controladores de estas estaciones bases (RNC en UTRAN). La arquitectura de UTRAN se especifica en el documento 3GPP TS 25.401 [23], los equipos controladores albergan el plano de control de la interfaz radio (señalización de control del enlace radio) así como múltiples funciones de plano de usuario (algunas funciones de la capa de acceso al medio, control de enlace, compresión de cabeceras, etc.). Por otro lado, las estaciones base se ocupan principalmente de las funciones de

transmisión radio y su operación se gestiona de forma remota desde los equipos controladores. La interconexión entre estaciones base y controladores se realiza mediante una interfaz denominada *lub* de forma que la topología de red resultante a nivel lógico es una topología en forma de estrella.

Comparando la arquitectura de UTRAN con E-UTRAN, puede observarse en la Figura 14, E-UTRAN sigue una arquitectura “plana”, sin ningún nivel de jerarquización. Los protocolos radio se ejecutan íntegramente en los eNBs (no es necesario ningún equipo adicional como el RNC de UTRAN). La interconexión de E-UTRAN con la red troncal se realiza en cada uno de las estaciones base (eNBs) mediante la interfaz S1. Tal como se ha comentado anteriormente, la interfaz S1 soporta configuraciones donde un eNB puede estar conectado simultáneamente con múltiples elementos de la EPC (varios MME y/o varios S-GW). Esto hace que el dimensionamiento de la red de acceso (eNBs) y de los equipos de la red troncal (MME y pasarelas S-GW) pueda hacerse de forma más flexible. Por el contrario, en una estructura jerárquica en árbol como la utilización en UTRAN, la capacidad sobrante en nodos ubicados en ramas diferentes no puede ser aprovechada. Asimismo, las estaciones base de E-UTRAN puede conectarse directamente entre si formando una topología semi-malla (un eNB puede conectarse a un subconjunto de eNBs mediante la interfaz X2) que permite tanto la transferencia de formación de control como de tráfico de usuarios entre ellas.

4.2 Núcleo de red: EPC

El núcleo de la red es conocido como EPC (Evolved Packet Core) en el SAE y está compuesto por varios elementos que se observan a la figura anterior y se detallan en la siguiente tabla (Figura 15) con sus respectivas funciones. Los protocolos que se dan entre esta red y el UE se les conocen como protocolos NAS (Non Access Stratum).

El diseño de la red troncal EPC ha sido concebido principalmente para proporcionar un servicio de conectividad IP (evolución del servicio GPRS) mediante una arquitectura de red optimizada que permite explorar las nuevas capacidades que ofrece la red de acceso E-UTRAN.

Elementos de EPC	Función
MME	Procesar información de señalización entre el núcleo de la red y el UE. Establecer, mantener y liberar portadores. Gestionar la seguridad y el establecimiento de la conexión entre el UE y la red.
P-GW	Asignar una dirección IP para un UE así como de realizar la facturación basada en el flujo. Encargado de la aplicación de los QoS.
S-GW	Transferir paquetes IP y almacenar información de movilidad local cuando un UE transita a través de varios eNodeB.
PCRF	Provee la autorización de QoS y controla las funciones de facturación basadas en el flujo.
HSS	También conocido como HLR (Home Location Registrar). Contiene datos de la subscripción del usuario e información dinámica como la identificación del MME al que el usuario está conectado actualmente.

Figura 14. Elementos de EPC y sus funciones

4.3 Técnicas de multi-antenas en LTE

Las técnicas multi-antena (MIMO: Multiple Input Multiple Output) se refieren en general a estructuras de transmisión y/o recepción que utilizan diversas antenas acompañadas de técnicas de procesamiento de señal con distintos niveles de complejidad. Las técnicas multi-antena permiten mejorar las prestaciones del sistema, bien sea aumentando la capacidad (más usuarios por célula), mejorando la cobertura o mejorando la velocidad de transmisión por usuario.

Esto se hace posible en LTE usando configuraciones de antenas como 2x2 o 4x4 usando el beamforming.

Se puede observar en la siguiente figura presentada el funcionamiento de la técnica MIMO:

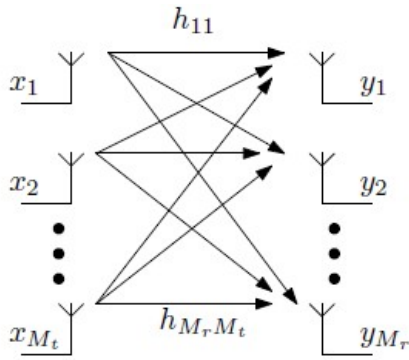


Figura 15. Funcionamiento de MIMO

Para entender el principio de ganancia de los sistemas MIMO, se puede considerar la analogía con la transmisión por cable. Si un transmisor envía una señal por cable, la capacidad de transmisión de información, C , viene dada por la fórmula de Shannon presentada en la Ecuación (4.1):

$$C \left(\frac{\text{bit}}{s} \right) = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.1)$$

S es la potencia de señal, y N es la potencia de ruido en el receptor, B es el ancho de banda del canal.

Si el transmisor emplea su potencia disponible y banda de frecuencia para transmitir no una señal, sino n señales diferentes a n receptores, utilizando para ellos n cables, la capacidad de transmisión total es:

$$C \left(\frac{\text{bit}}{s} \right) = n \times B \times \log_2 \left(1 + \frac{1}{n} \times \frac{S}{N} \right) \quad (4.2)$$

La capacidad de transmisión en este segundo caso es superior a la de primero, ya que el factor n que se encuentra fuera del logaritmo tiene un peso mayor que el mismo factor n que se incluye dentro del logaritmo como divisor.

Desde punto de vista de la propagación, el canal radio no es único, existe un canal entre cada antena transmisora y cada antena receptora, lo que obliga a representar la propagación mediante una matriz, que se conoce como matriz de transmisión, la matriz H , el elemento h_{ij} representa la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la antena receptora i .

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M_t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M_r1} & h_{M_r2} & \dots & h_{M_rM_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \dots \\ n_{M_t} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Estas señales llegan de las antenas transmisoras a las receptoras después de varias reflexiones en edificios o paredes, y que la combinación de reflexiones es diferente para cada combinación de reflexiones. Es decir, las antenas MIMO añaden a la propagación una nueva capacidad de multiplexación, la multiplexación espacial.

En el caso de que la propagación por rayo directo solamente existe un modo de propagación, no hay reflexiones, y el hecho de aumentar el número de antenas no proporciona ganancia alguna. Sólo a medida que la propagación se vuelve multi-trayecto empieza a descorrelarse los caminos, y a aumentar el número de modos. Esta situación corresponde a condiciones de propagación pobre, que son las que se dan en entorno metropolitanos o de interior en las comunicaciones móviles.

4.4 Capa física

La interfaz aérea de LTE está compuesta por canales físicos y señales físicas. Las señales físicas se usan para la sincronización del sistema, identificación de celda, estimación del canal de radio. Y los canales físicos se encargan de transportar los datos provenientes de las capas superiores por intermedio de la sub-capas MAC [17].

La siguiente tabla muestra un resumen de las señales físicas:

Señales físicas en el enlace descendente	Propósitos
Señal de sincronización primaria	Usada para que el UE identifique y busque la celda. Llevan parte del ID de celda (una de tres secuencias ortogonales)
Señal de sincronización secundaria	Usada para que el UE identifique y busque la celda. Lleva el resto del ID de la celda (una de 168 secuencias binarias posibles)
Señal de referencia	Usada para la estimación del canal descendente. La secuencia exacta se desprende del ID de la Celda (Una de $3 \times 168 = 504$ secuencias pseudo-aleatorias)
Señales físicas en canal ascendente	Propósitos
Señales de referencia (demodulación y sonido)	Usada para la sincronización del UE y para la estimación del canal ascendente

Figura 16. Señales físicas en el enlace descendente

Las principales funciones de la capa física son las siguientes:

- Detección de errores en el canal de transporte y reporte de las mismas a las capas superiores.
- Codificación y decodificación FEC.
- Adaptación de tasa.
- Mapeo del canal de transporte al canal físico.
- Sincronización de tiempo y de frecuencia.
- Reporte de medidas del canal de radio a capas superiores
- Procesamiento de señales de antenas MIMO, diversidad de transmisión y beamforming.
- Procesamiento de RF

La capa física soporta OFDMA para el canal descendente y SC-FDMA para el canal ascendente. Ambos tipos de duplexación, FDD y TDD, son soportadas en la capa física de LTE y ambas comparten la misma estructura de trama (trama con duración de 10 ms y de 20 ranuras de tiempo). Pero cada canal de bajada y de subida es identificado con diferentes frecuencias y

tiempos. Para FDD los canales son identificados en dos bandas de frecuencia distintas, mientras que para TDD los canales se identifican en distintas ranuras de tiempo.

4.4.1 Estructura de trama genérica

La trama genérica de LTE tiene una duración de 10ms y está dividida en 10 sub-tramas de 1ms de duración (Figura 17). Cada sub-trama se divide en 2 slots de 0.5ms teniendo así 6 o 7 símbolos OFDM dependiendo de la longitud del prefijos cíclicos. Cada slot usa 7 símbolos OFDM en el caso de prefijo cíclico normal y 6 símbolos en el caso del prefijo cíclico extendido. La trama genérica para DL y UL se muestra en la siguiente figura.

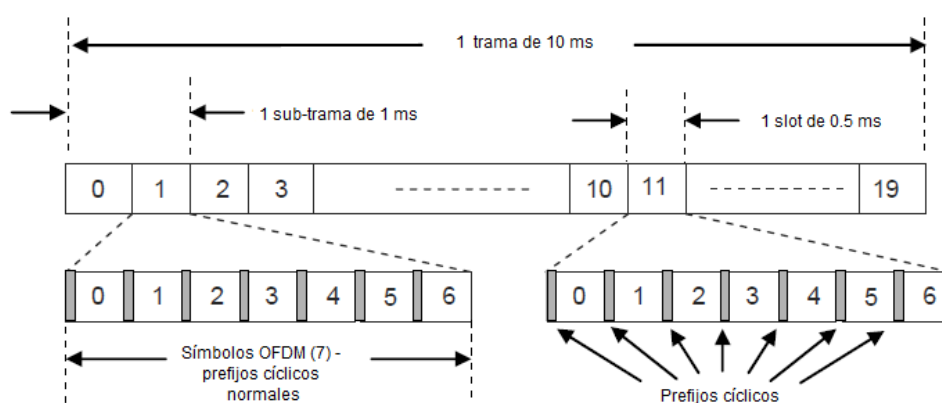


Figura 17. Estructura de la trama genérica para DL y UL de LTE

En el caso de FDD, todas las sub-tramas se usan tanto para transmisiones de subida como de bajada. En el caso de TDD, las sub-tramas 1 y 6 se usan para transmisiones de DL y las demás son usadas para DL y UL. Las subtramas 1 y 6 contienen señales de sincronización para el DL.

4.4.2 Capa física LTE para la transmisión DL

4.4.2.1 Parámetros de modulación DL

Hay dos tipos de CP que son usados dependiendo de las características del retardo de dispersión de la radio celda. El CP normal es usado en áreas urbanas o de frecuencias altas y el CP extendido es usado en áreas rurales y áreas con frecuencias bajas.

El esquema de transmisión usado en DL es OFDM usando un prefijo cíclico. La separación entre sub-portadoras es de 15 KHz con una duración por símbolo de $66.67 \mu s$. El DL usa una separación de 7.5 KHz con una duración de $133 \mu s$ en el caso de MBSFN (Multicast-Broadcast Single Frequency Network). El MBSFN hace referencia a la red móvil usando una sola banda donde señales de broadcast y dedicadas comparten una frecuencia.

Los parámetros de transmisión para distintas configuraciones de ancho de banda de transmisión para LTE se muestran en la siguiente tabla.

Parámetros	Valores					
Ancho de Banda de transmisión (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Duración de sub-trama (ms)	0.5					
Espaciamiento de sub-portadora (KHz)	15					
Frecuencia de muestreo (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Tamaño FFT	128	256	512	1024	1536	2048
OFDM símbolos por slot normal/CP extendido)	7/6					

Figura 18. Parámetros de modulación DL

4.4.2.2 Recursos físicos de DL

Estos recursos consisten en bloques conocidos como PRBs (Physical Resource Blocks) [8]. Un PRB es el elemento más pequeño de la asignación de recursos realizado por el planificador de la estación base. Cada PRB consiste de 12 subportadoras consecutivas para 1 slot de 0.5 ms. El ancho de banda del PRB es de 180 KHz. Cada elemento de recurso corresponde a una sub-portadora para la duración de un símbolo OFDM. Por eso, dependiendo de la longitud del CP, un PRB comprende de 84 símbolos OFDM en el caso del CP normal y de 72 símbolos para el caso del CP extendido. El número de estos bloques depende del ancho de banda de banda de transmisión de LTE. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla.

Parámetros	Valores					
Ancho de banda de transmisión (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Ancho de banda de sub-portadora (KHz)	15					
Ancho de banda de PRBs (KHz)	180					
Número de PRBs disponibles	6	12	25	50	75	100

Figura 19. Parámetros de recursos físicos

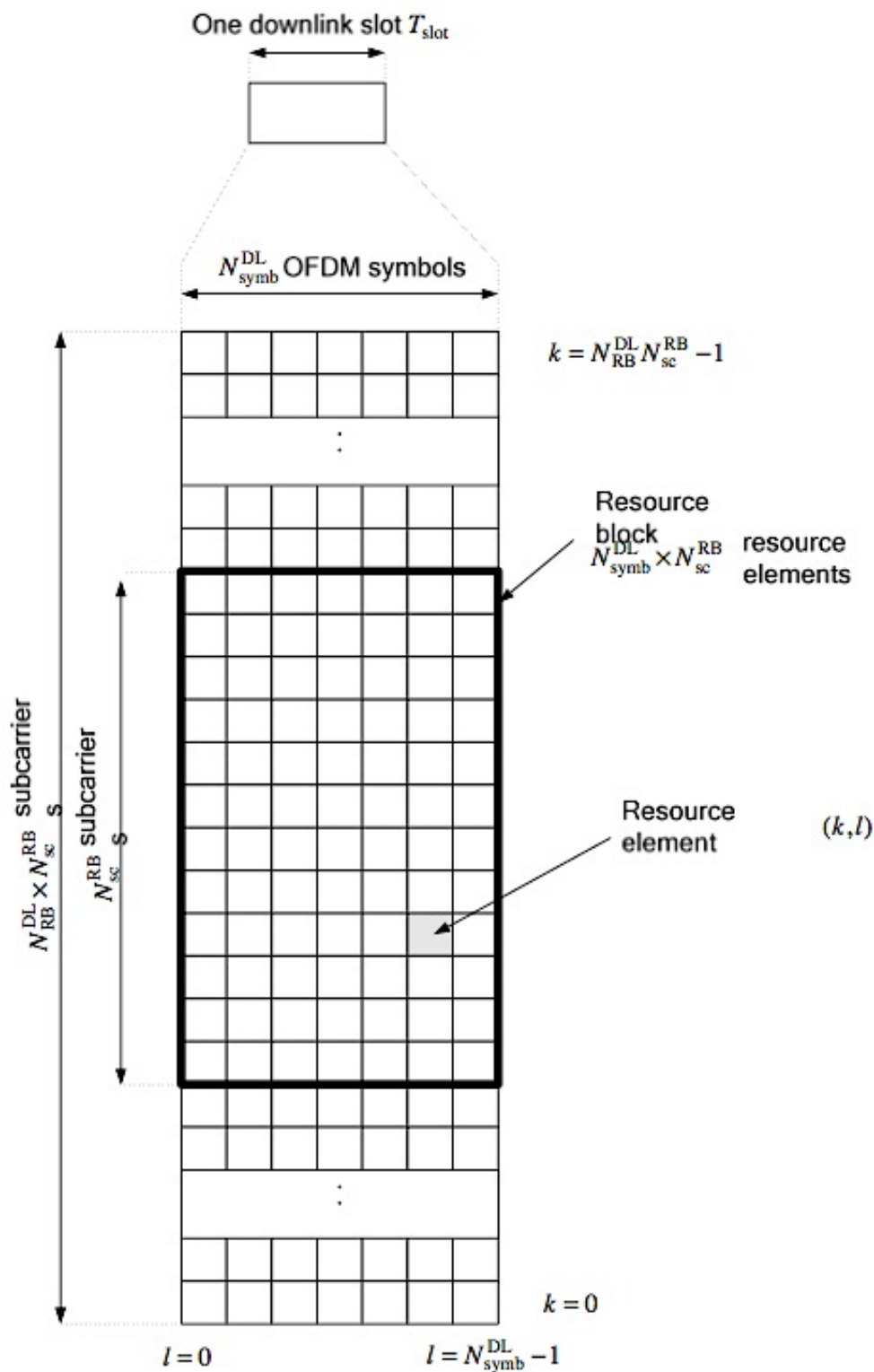


Figura 20. Recursos físicos de DL

Esta figura se basa en la estructura de trama genérica y nos muestra, que cada PBR consiste de 12 sub-portadoras con una separación de 15 KHz y un

número de símbolos OFDM N_{symb}^{DL} variable dependiendo del prefijo cíclico CP, CP normal, $N_{symb}^{DL} = 7$, CP extendido $N_{symb}^{DL} = 6$. En el downlink se puede soportar también una separación de 7,5KHz sólo para el caso del CP extendido con 24 sub-portadoras y 3 símbolos. Entonces, si consideramos un CP normal, una PBR de 84 elementos de recursos (7 símbolos x 12 sub-portadoras=84) corresponde a un slot en el dominio del tiempo, mientras que una PBR de 180 KHz (15KHz x 12 sub-portadoras = 180) corresponde al dominio de la frecuencia.

4.4.2.3 Procesamiento de la capa física de DL

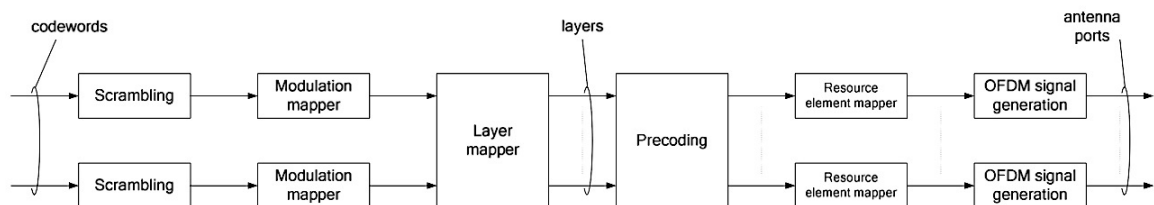


Figura 21. Procesamiento del canal físico

Esta figura presenta el procesamiento se da entre la MAC y la capa física mediante datos en bloques de transporte que recibe ésta última.

Los pasos del procesamiento son:

Inserción de CRC: un CRC (Cyclic Redudancy Check) es calculado e insertado al inicio de cada bloque. El CRC permite por el lado del receptor la detección de errores residuales en el bloque decodificado.

Codificación de canal: Usa un turbo código basado en QPP (Quadric Polinomial Permutation).

Procesamiento ARQ híbrido: Su tarea es extraer de los bloques el número exacto de bits a ser transmitidos dentro de un TTI dado.

Scrambling: El scrambling de data codificada asegurada que la decodificación por el lado del receptor pueda utilizar la ganancia de procesamiento dado por el código de canal.

Modulación: El downlink soporta modulaciones QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

Mapeo de antenas: Procesa de forma conjunta la modulación de símbolos correspondientes a dos bloques de transporte y mapea el resultado a diferentes antenas.

Mapeo de bloques de recurso: Mapea los símbolos a ser transmitidos en cada antena a elementos de recursos del conjuntos de bloques asignados al planificador MAC para la transmisión de los bloques de transporte.

4.4.3 Capa física LTE para la transmisión UL

4.4.3.1 Parámetros de modulación UL

La Figura 22 presenta los parámetros de modulación UL, cuyo esquema es similar al downlink en cuanto a la mayoría de parámetros y los valores observados en la tabla de parámetros de modulación de DL. Pero difiere en cuanto a la duración del CP por símbolos.

Parámetros	Valores
Separación de sub-portadoras (KHz)	15
Duración de sub-trama (ms)	0.5
SC-FDMA símbolos por slot (CP normal/CP extendido)	7/6
Duración de CP normal (us)	Símbolo #0:5.2 Símbolo #1-6:4.7
Duración de CP extendido (us)	Símbolo #0-5:16.67
Número de PRBs mínimo	6
Número de PRBs máximo	100

Figura 22. Parámetros de modulación UL

4.4.3.2 Recursos físicos de UL

Los recursos físicos de UL de la Figura 23 están conformados de igual manera que para el DL con la única diferencia que en el DL puede soportar un espaciamiento de frecuencia de 7.5 KHz.

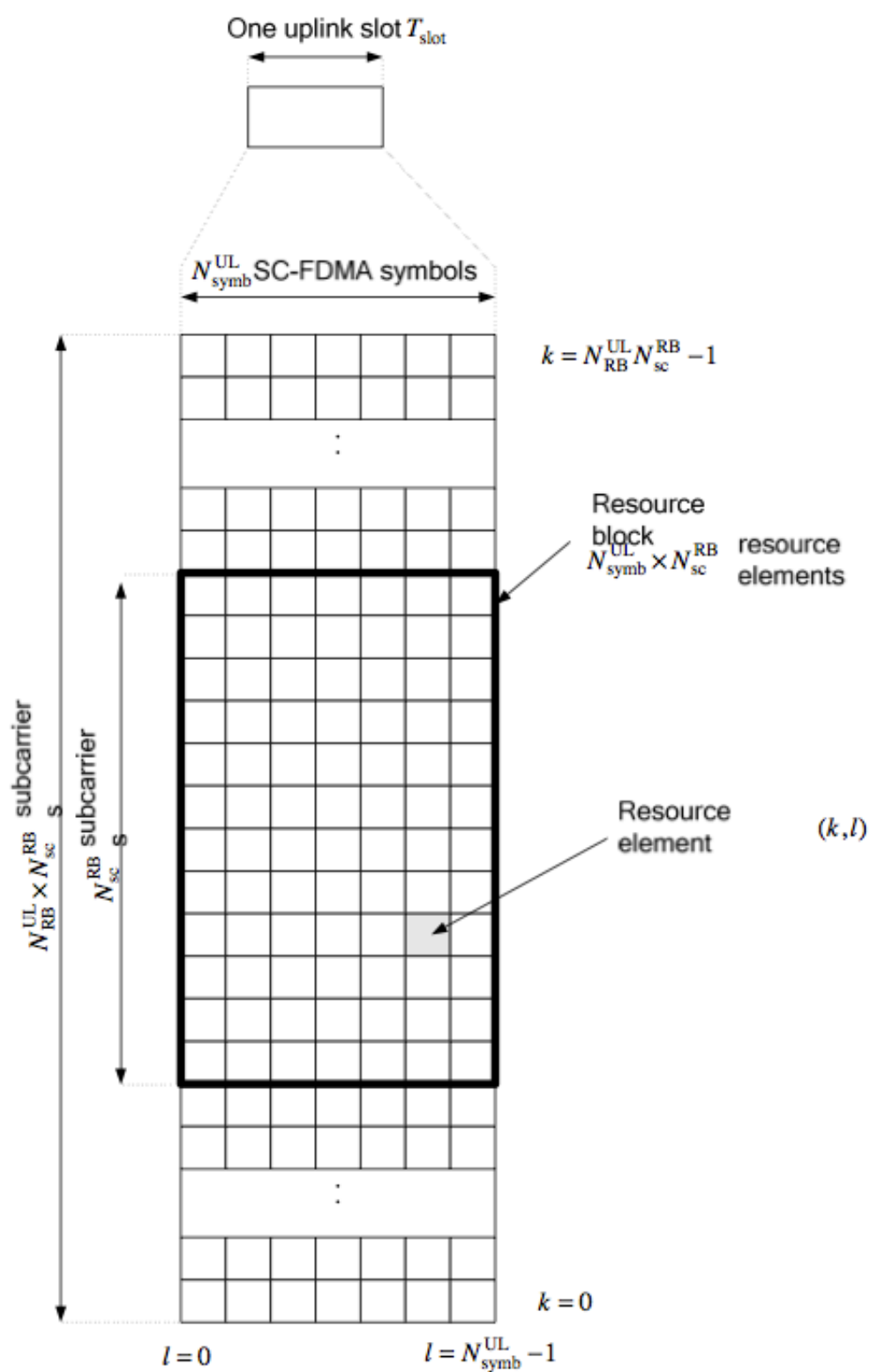


Figura 23. Recursos físicos de UL

Esta figura se basa en la estructura de trama genérica y nos muestra, que cada PBR consiste de 12 sub-portadoras con una separación de 15 KHz y un número de símbolos OFDM N_{symb}^{UL} variable dependiendo del prefijo cíclico CP, CP normal, $N_{symb}^{UL} = 7$, CP extendido $N_{symb}^{UL} = 6$.

5 PLANIFICACIÓN DEL SISTEMA LTE

5.1 Problemas de planificación

La definición de *calidad del servicio* [UIT E.800] se refiere a: “*Efecto global de la calidad de funcionamiento de un servicio que determinan el grado de satisfacción del usuario*”, [3] son las tecnologías que garantizan la transmisión de cierta cantidad de información en un tiempo dado (*Throughput*). Cuyos parámetros están presentadas por la siguiente figura:

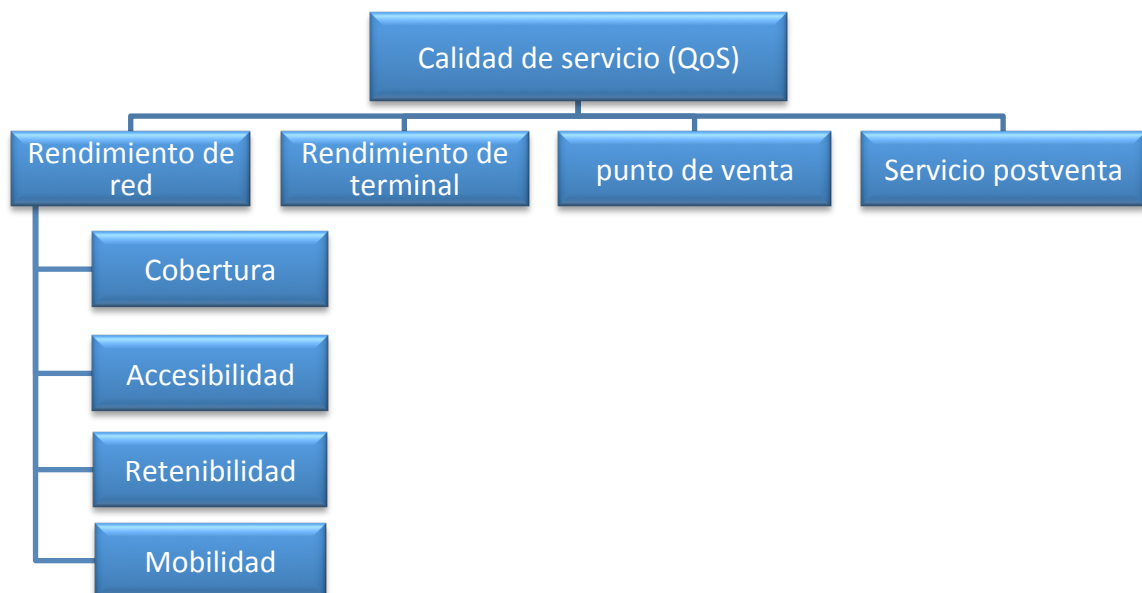


Figura 24. Parámetros de QoS

El análisis de las medidas de calidad realizadas permite llevar a cabo la optimización de la red una vez que ha sido desplegada, permitiendo ajustar los parámetros y características de la red definidas durante la fase de planificación. En la mayoría de los casos, existen diferencias entre las condiciones y criterios aplicados para la planificación de la red y las que luego realmente se dan cuando se despliega.

Por otra parte, las últimas tendencias proponen soluciones de gestión optimizadas de los recursos de red basadas precisamente en la medida y monitorización de la calidad de servicio ofrecida por la red, y demandada en cada momento por los usuarios. Estas propuestas hacen uso de algunos de los parámetros o KPIs (Key Performance Indicators), y permiten no sólo la gestión de ciertas funciones de la red, como el control del traspaso

(*handover*) o de potencia, sino también la asignación dinámica a los usuarios de unos u otros recursos de la red (o redes, en caso de existir varias) en función del estado de ésta.

Para no empobrecer el rendimiento de la red, se activan únicamente la petición del operador en aquellas células que se desea monitorizar, y durante un periodo determinado. Los sistemas y herramientas de análisis se encargan de tratar esos datos, procesarlos y entregar los indicadores clave o KPIs, capaces de ofrecer una imagen fiel de funcionamiento de la red. Estos indicadores pueden referirse a la hora de cargada o bien ser el valor medio diario.

En la Figura 25 demuestra el evolución experimentada durante un mes, cuyo eje vertical presenta numero de conexión en cada periodo.

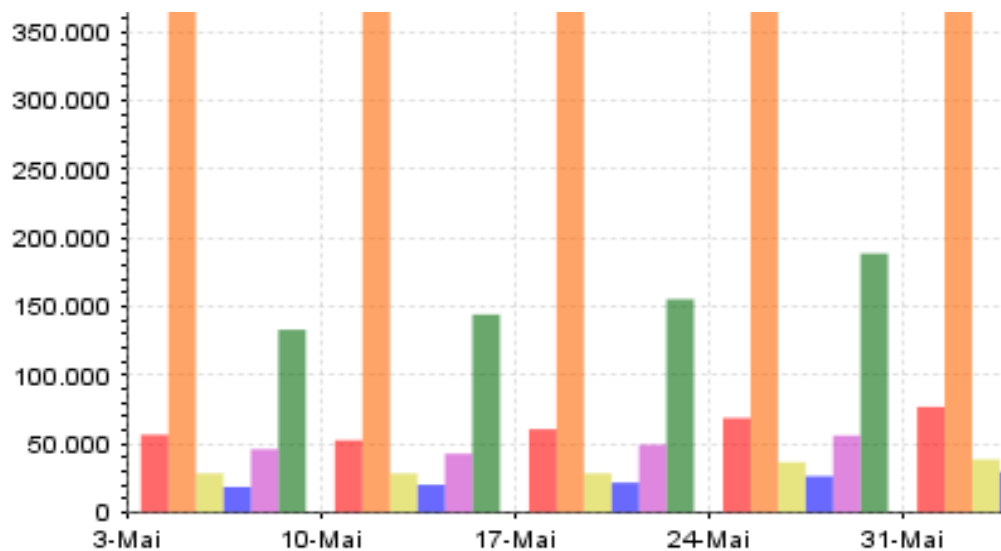


Figura 25. Ejemplo de la evolución experimentada a largo de un mes

En la Figura 26 puede ver algunos de los KPIs más significativos para evaluar la calidad de servicio son:

- La tasa de llamadas con éxito (call success rate)
- La tasa de llamadas caídas (dropped call rate)
- La tasa de traspasos con éxito (handover success rate)
- La velocidad de transferencia por célula (throughput per cell)
- La ocupación de TLS (Transport Layer Security)
- El bloqueo de TBFs (Temporary Block Flow)

El tratamiento adecuado de estos datos puede permitir la localización de zonas con problemas de funcionamiento por cuestión de configuración,

capacidad o interferencia, reflejados como el número de llamadas no atendidas, caídas, reintentos, etc.

Name	Value
RRC Setup Success Rate (%)	98.32%
Intra Frequency HO Attempt Success Rate (%)	76.00%
Intra Frequency HO Success Rate (%)	100.00%
Inter Frequency HO Success Rate (%)	--
ERAB Setup Success Rate (%)	100.00%
RRC Setup Success Counter	409
RRC Setup Failure Counter	7
ERAB Setup Success Counter	102
ERAB Setup Failure Counter	0
ERABNormalRel Counter	0
ERAB Abnormal Rel Counter	101
Intra Frequency HO Time Delay Avg (ms)	14.58ms
Inter Frequency HO Time Delay Avg (ms)	--

Figura 26. KPIs significativos del test

5.2 Modulación y codificación

Una tarea importante en LTE es la selección del formato de modulación y codificación más adecuado en todo momento para las transmisiones de cada usuario. A este proceso de decisión se le denomina “adaptación dinámica del enlace”. En LTE se implementa un mecanismo de adaptación dinámica del enlace basado en control de la tasa binaria (rate control), que consiste en ir variando la tasa de binaria asignada a un usuario activo en función de la calidad de canal. Así, el usuario percibirá una tasa binaria alta si la calidad del canal es buena, y baja si la calidad de canal es mala.

Esta estrategia intenta extraer el máximo rendimiento del canal (en términos de velocidad de transmisión) mediante la selección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits por símbolo ante unas condiciones de SINR dada. Se puede apreciar que para SINR baja, se emplea mecanismos de modulación y codificación más robustos como QPSK, a costa de tener una baja eficiencia espectral y por lo tanto reducir la tasa binaria. Para la SINR alta, se emplea modulaciones 16 QAM y 64 QAM.

En la siguiente figura se demuestra un esquema de modulación para distintos valores de SINR.

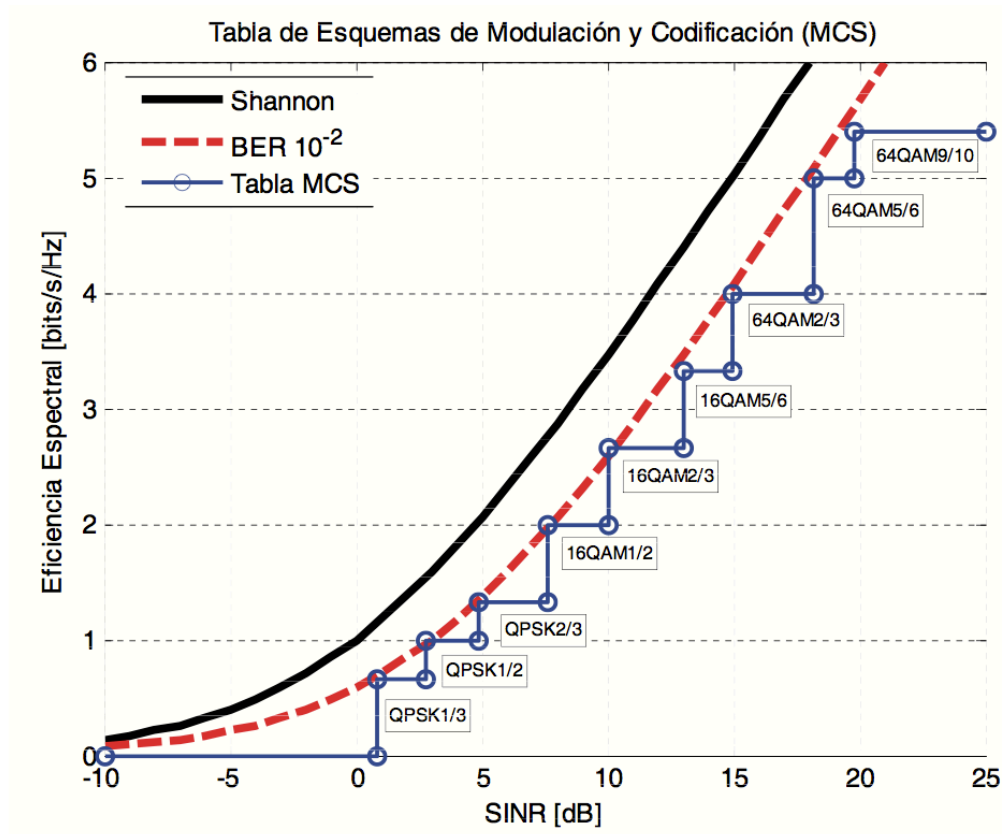


Figura 27. Tabla de modulación y codificación en función de la SINR

5.3 Modelo de propagación

5.3.1 Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata [9] usado para propagación en ambientes urbanos, válido para frecuencias hasta 1500 MHz. Todos los modelos de propagación tienen una alta tolerancia, lo que resta cierta validez a los resultados entregados por dichos modelos. La forma más efectiva para estimar las distancias de los enlaces es mediante modelos de propagación y luego pruebas en terreno.

Podemos considerar las pérdidas del urbano en dB de este modelo de siguiente forma:

$$L = 69.55 + 26.16 * \log(f_c) - 13.82 * \log(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 * \log(h_{tx})) * \log(d) \quad (5.1)$$

Donde:

f_c : Frecuencia de la portadora en MHz.

h_{tx} : Altura de la antena transmisora en metros, válido para $30\text{m} < h_{tx} < 200\text{m}$

h_{rx} : Altura de la antena receptora en metros, válido para $1\text{m} < h_{rx} < 10\text{m}$

$a(h_{rx})$: Factor de corrección para la altura efectiva de la antena móvil

d : Distancia entre transmisor y receptor en km

El factor de corrección de altura $a(h_{rx})$ puede tomarse distintos valores dependiendo del ambiente de estudio, entonces $a(h_{rx})$ se puede definir como:

Para ciudades pequeñas y medianas:

$$a(h_{rx}) [\text{dB}] = (1.1 \cdot \log(f_c) - 0.7) \cdot h_{rx} - (1.56 \cdot \log(f_c) - 0.8) \quad (5.2)$$

Para ciudades grandes:

$$a(h_{rx}) [\text{dB}] = 3.2 \cdot ([11.75 \cdot h_{rx}])^2 - 4.97 \quad (5.3)$$

Según los informes que hemos sacado del proyecto de Drive Test, la frecuencia que usa para la medición es 2600 Mhz, por lo tanto, no es adecuado de usar el modelo de Okumura-Hata.

5.3.2 COST 231

El modelo COST-231 es un modelo semi-empírico de predicción de las pérdidas en un trayecto, extensión en frecuencia de modelo de propagación Okumura-Hata. Generalmente se utiliza para frecuencias menores a 2000 MHz, aunque usado también en predicciones para 2.5 GHz, y asumiendo una menor precisión de los resultados, se acepta una expansión hasta 3.5 GHz.

Es recomendado para macro-células en escenarios urbanos y suburbanos, con buenos resultados de las pérdidas en el trayecto para antenas transmisoras situadas por encima de la altura media de los tejados.

El modelo indica las pérdidas del urbano en dB con la siguiente ecuación:

$$L = 46.3 + 33.9 * \log f_c - 13.82 * \log h_{tx} - a(h_{rx}) + (44.9 - 6.55 * \log h_{tx}) * \log d + C_M \quad (5.4)$$

C_M es un factor de corrección para adecuar el modelo extendiendo el rango de frecuencias para el que opera el modelo. Se basa en pruebas empíricas, las cuales demuestran que para grandes ciudades es mayor que para áreas suburbanas. Entonces C_M puede tomar los siguientes valores:

$C_M = 0$ dB para ciudades medianas y áreas suburbanas

$C_M = 3$ dB para centro metropolitanos

6 DESPLIEGUE DE LA RED LTE

En cuanto al despliegue de red, un aumento progresivo de la demanda se cubre con un aumento progresivo de estaciones base. Antes de pasar a identificar diferentes componentes asociadas al despliegue que se espera jueguen un papel relevante en el contexto de LTE, conviene destacar a continuación el compromiso existente entre cobertura y velocidad de transmisión, así como el impacto de la movilidad como elemento limitado del despliegue.

6.1 Resultado experimental del operador

6.1.1 Drive Test

Las medidas están basadas en una prueba de mediciones de señales RF en medio ambiente, denominado *Drive Test*.

El recorrido de las rutas debe pasar por: todas las calles principales, las vías importantes, todos los emplazamientos y todos los sectores, las áreas especiales e importantes si es necesario.

Para realizar drive test se necesitan mínimo los siguientes equipos y software:

- Un móvil LTE, en este caso es un modem USB para hacer llamadas de datos en sentido UL y DL.
- Un scanner para obtener los parámetros de la zona.
- Una antena.
- Un GPS
- Una computadora portátil con el software de medida (*Genex Probe*) instalado.
- Un vehículo para realizar el *drive test*

Para poder iniciar el *drive test* los equipos deben conectarse y configurarse de la siguiente manera:

Se conecta la antena al scanner. Tanto el scanner como el UE se conectan a la computadora portátil. Se enciende todo y luego se inicia el programa. Se deben configurar los puertos donde están conectados el scanner y el software. El GPS está también conectado al portátil y configurado con el software para poder compartir la ubicación geográfica, y monitorizándolo en la pantalla. Una vez todo esté listo se inicia el drive test.

La duración de las llamadas y el intervalo de tiempo entre cada llamada debe estar configurado por el software, y será diferente dependiendo de las mediciones que nos interesan.

Después de haber hecho el *drive test*, el recorrido se almacena en un archivo con formato .log, el cual puede ser reproducido para su respectivo análisis y así, de ser necesario, corregir los errores que se observen en la red.



Figura 28. Equipos de medición de cobertura—drive test

En la siguiente figura presenta el espectro de una señal LTE a través del Drive Test.

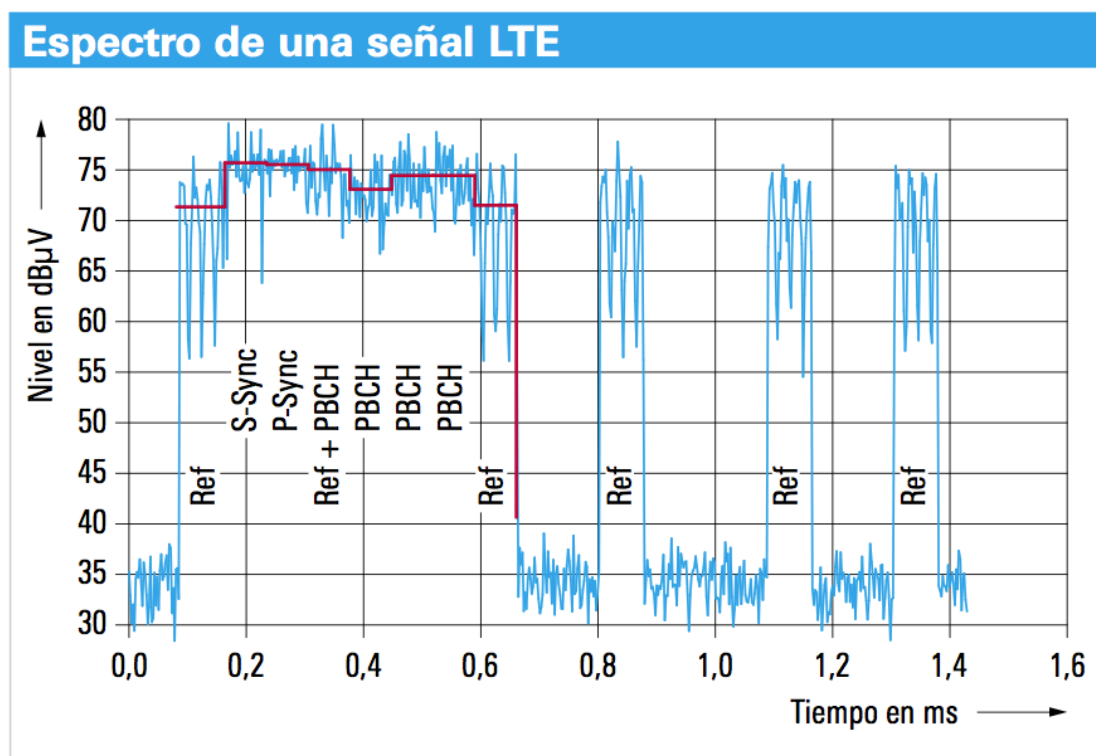


Figura 29. Señalización LTE sin datos útiles

6.1.2 Antenas

La antena que se utiliza para el despliegue por el operador es el modelo 80010675 de KATHREIN [7]. Las especificaciones de dicha antenas son siguientes:

General specifications:

Frequency range	790–960 MHz 1710–2170 MHz 2490–2690 MHz
Impedance	50 ohms
VSWR	<1.5:1
Intermodulation (2x20w)	IM3: <-150 dBc
Polarization	+45° and -45°
Connector	6 x 7-16 DIN female (long neck)
Weight	57.3 lb (26 kg) 61.7 lb (28 kg) clamps included
Dimensions	78.6 x 11.8 x 6 inches (1997 x 300 x 152 mm)
Wind load Front/Side/Rear	at 93 mph (150kph) 230 lbf / 88 lbf / 237 lbf (1020 N) / (390 N) / (1050 N)
Mounting category	M (Medium)
Wind survival rating*	120 mph (200 kph)
Shipping dimensions	91.2 x 12.7 x 7.5 inches (2316 x 322 x 190 mm)
Shipping weight	68.3 lb (31 kg)
Mounting	Fixed mounts for 2 to 4.6 inch (50 to 115 mm) OD masts are included and tilt options are available.

Figura 30. Especificaciones generales

Esta antena permite la elección del rango de frecuencia de 790 MHz a 2690 MHz (Figura 31), facilita la medición de señales LTE cómodamente.

Specifications:	790–862 MHz			824–894 MHz			880–960 MHz			1710–1880 MHz			1850–1990 MHz			1920–2170 MHz			2490–2690 MHz			
Gain	tilt (dbi)	0° 16	5° 16	10° 15.5	0° 16.1	5° 16.1	10° 15.6	0° 16	5° 16.2	10° 15.6	0° 18	3° 18	6° 17.6	0° 18	3° 18	6° 17.5	0° 18.1	3° 18.1	6° 17.4	0° 17.8	3° 17.8	6° 17.6
Front-to-back ratio (180°±30°)	>27 dB (co-polar)			>27 dB (co-polar)			>27 dB (co-polar)			>25 dB (co-polar)			>25 dB (co-polar)			>25 dB (co-polar)			>25 dB (co-polar)			
Maximum input power per input (at 50°C) total (at 50°C)	500 watts			500 watts 1000 watts			500 watts			200 watts			200 watts 400 watts			200 watts			200 watts 400 watts			
+45° and -45° polarization																						
horizontal beamwidth	68° (half-power)			67° (half-power)			65° (half-power)			62° (half-power)			63° (half-power)			62° (half-power)			63° (half-power)			
vertical beamwidth	10.3° (half-power)			10.1° (half-power)			9.8° (half-power)			4.8° (half-power)			4.6° (half-power)			4.4° (half-power)			3.5° (half-power)			
Electrical downtilt continuously adjustable	0°–10°			0°–10°			0°–10°			0°–6°			0°–6°			0°–6°			0°–6°			
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	0° dB	5° 18	10° 17	15° 15	0° 18	5° 18	10° 16	0° 18	5° 18	10° 16	0° 18	3° 16	6° 16	0° 18	3° 18	6° 17	0° 18	3° 17	6° 17	0° 18	3° 18	6° 18
Cross polar ratio (typical)																						
Main direction 0° (dB)	22			22			22			18			22			23			25			
Sector ±60° (dB)	>10 dB			>10 dB			>10 dB			>10			>10			>10			>10			

Figura 31. Especificaciones

Una Medida para el rendimiento de la antena es la ganancia de la antena, la utilizamos para compensar la pérdida de camino, y aumentar la RSRP, con el fin de mejorar la cobertura de la zona.

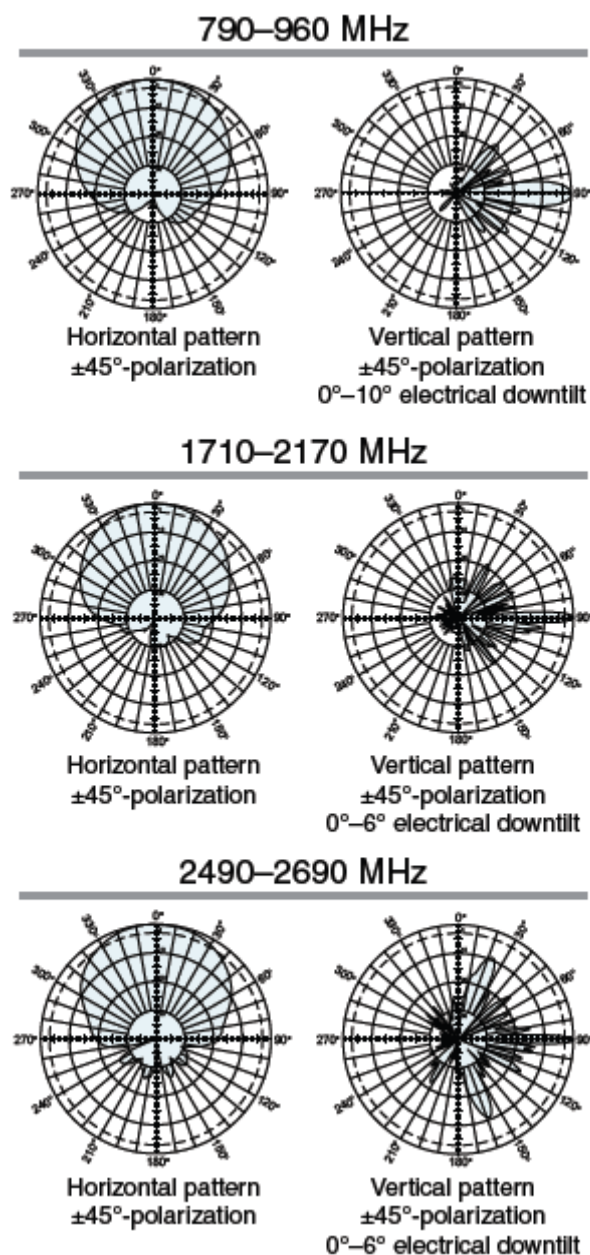


Figura 32. Diagramas de polarización según el rango de frecuencia

Las antenas direccionales se pueden inclinar tanto mecánicamente como eléctricamente para que el lóbulo principal apunte más bajo. Mediante esta inclinación, el diagrama de radiación de la antena y los niveles de intensidad de campo a grandes distancias se puede reducir sustancialmente.

Se utiliza antena de polarización + 45° / -45° (Figura 32), que aporta ciertas ventajas en las regiones planas, ya que los componentes horizontales son escasos debido a la reducción de reflexiones. Por consiguiente, reduce las interferencias en las celdas vecinas y también mejora la cobertura.

6.1.3 Condición de medidas

En este proceso vamos a obtener la probabilidad de cobertura, a través de SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) y RSRP (Reference Signal Received Power).

Para la medición, es necesario cumplir la siguiente condición de RF:

$$\text{RSRP} \geq -110 \text{ dBm}, \text{ SINR} \geq -3 \text{ dB}$$

RSRP

RSRP (Reference Signal Received Power), Esta medida proporciona una estimación de la intensidad de la señal recibida a nivel de celda, y es útil para la toma de decisión acerca de la ejecución de procedimientos de tantos cambios de celda como de *handover*. El RSRP se mide como el promedio lineal sobre las potencias recibidas de los *resource elements* que transportan la Reference Signal de una celda determinada en un ancho de banda especificado.

En la Figura 33 está demostrado los valores RSRP obtenidos a través del drive test.

Distancia (Km)	RSRP (dBm)
0.1	-77.4
0.5	-91.3
0.8	-100.7
1	-106.4
1.3	-109.8
1.6	-112.4
1.8	-120.3
2	-133.6

Figura 33. Datos de Drive Test: RSRP versus Distancia

Estos valores de Figura 33 también se puede presentar en un mapa (La figura 34), que se presenta en una ruta determinada de Madrid centro, en el que cada valor determinado se presenta en distintos rangos de valores de RSRP:

- [-80, 0]dBm
- [-90, -80]dBm
- [-100, -90]dBm

● [-110, -100]dBm

● [-150, -110]dBm

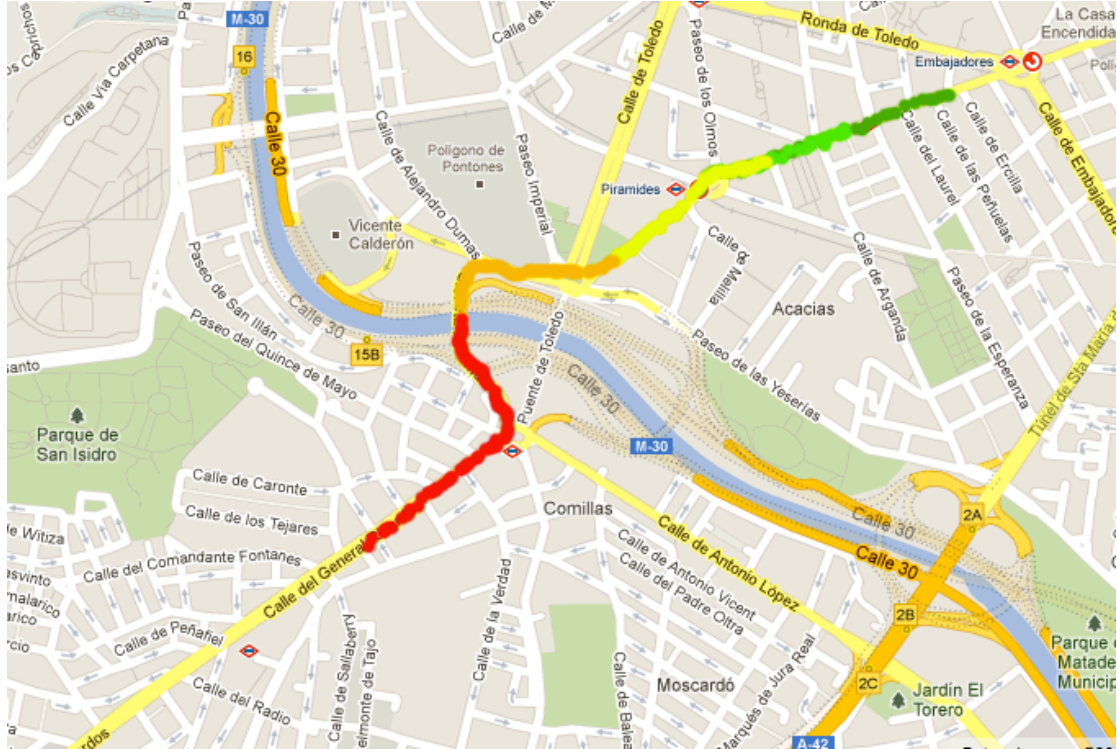


Figura 34. Representación valores RSRP de un recorrido Drive Test

SINR

La métrica de rendimiento para el planificador de radio LTE es SINR [8], definido como Relación Señal a Ruido más Interferencia.

$$SINR = \frac{S}{N + I} \quad (6.1)$$

Donde S es la potencia recibida de la señal, I es la potencia de interferencia, y N es la potencia de ruido.

La SINR también puede escribirse bajo la relación Señal Ruido, SNR

$$SINR = \frac{S}{I + N} = \frac{S}{\gamma I_{\max} + N} = \frac{1}{\frac{\gamma}{SIR_{\min}} + \frac{1}{SNR}} \quad (6.2)$$

Donde γ es el factor de interferencia. Su rango es $[0,1]$. El valor de SIR depende de la configuración geométrica de las antenas, esta interferencia

causada por el borde de la celda proviene de las otras celdas vecinas y próximas. Puede fijar la relación por la figura 35.

Los valores típicos de SIR_{\min} son -4 ... -1 dB. La interferencia esta modelado como ruido Gaussiano, y siempre se aplica $SINR < \gamma^{-1}SIR_{\min}$ y $SINR < SNR$.

La relación entre SINR y SNR se demuestra en la siguiente figura, con diferentes valores de γ .

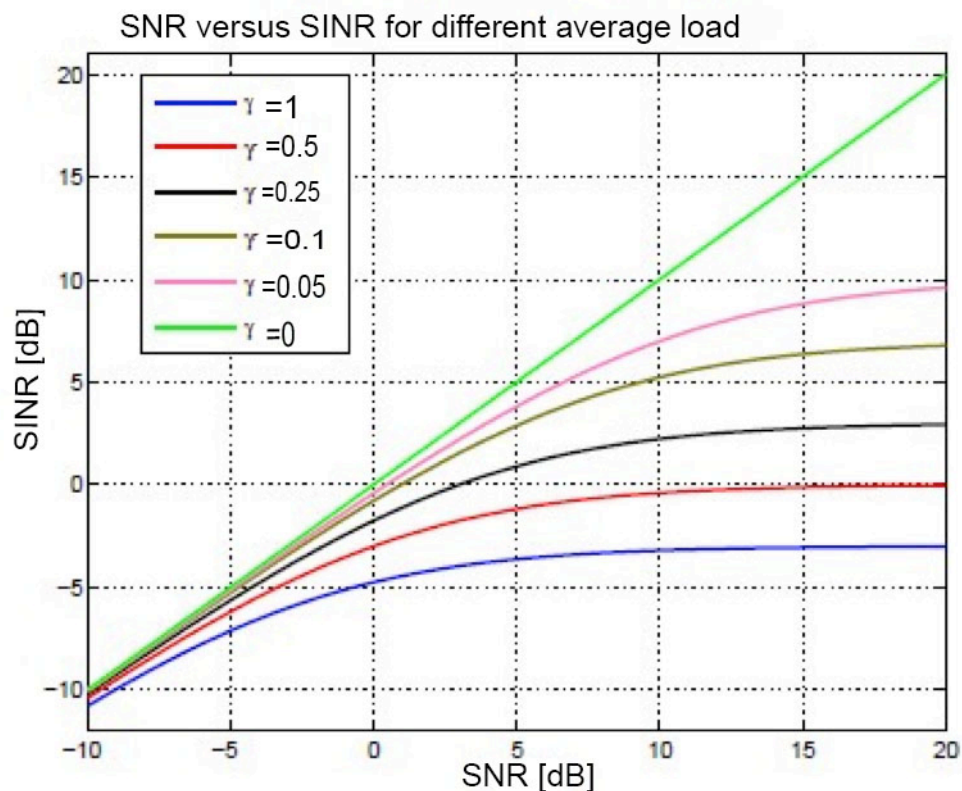


Figura 35. Relación entre SINR y SNR variando el valor de γ

El resultado del drive test para la SINR tiene un valor media de 15.58 dB, el máximo valor es 30 dB, y el mínimo es -17.05.

En la figura 36 demuestra una tabla del resultado de la SINR obtenido a partir de las medidas de drive test, observamos que a mayor distancia, menor será la SINR.

Distancia (Km)	SINR (dB)
0.1	30
0.5	25
0.8	15
1	13
1.3	12
1.6	-8
2	-13

Figura 36. Resultado experimental de SINR versus distancia

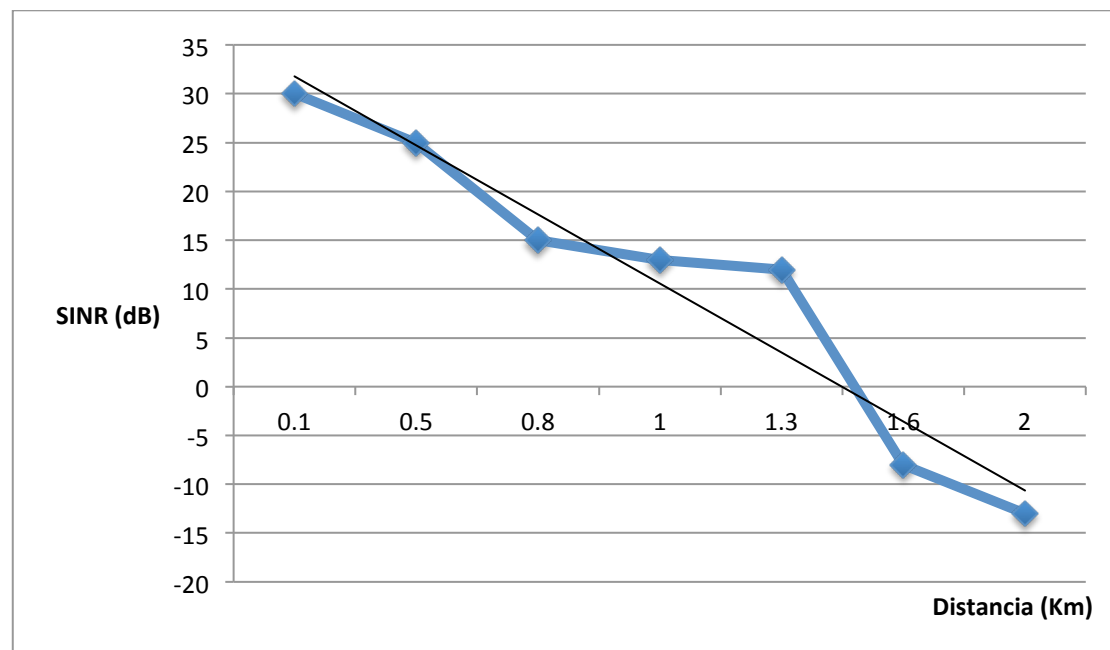


Figura 37. Gráfica resultado experimental de SINR versus distancia

6.2 Resultado teórico

Nuestro resultado teórico está calculado a partir del análisis del modelo de propagación COST-231.

RSRP

Obsérvese en la figura siguiente que en determinadas posiciones de la rejilla frecuencia-tiempo de la subtrama se ubican las denominadas señales de referencia. Obviamente en estas posiciones no se puede transmitir ningún símbolo o bit.

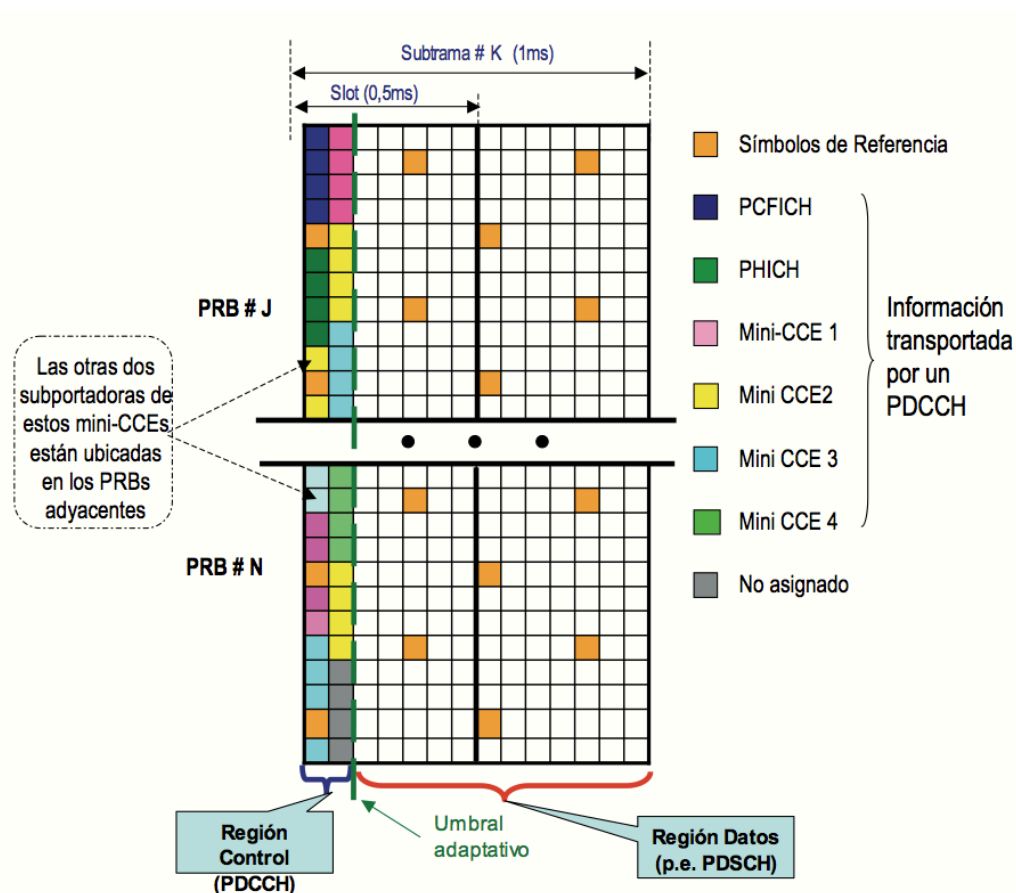


Figura 38. Detalle de la ubicación del contenido del canal PDCCH, considerando que ocupa sólo dos símbolos OFDMA.

La potencia recibida $Pr(\text{dBm})$ resulta de la potencia empleada en el transmisor una vez a sufrido las pérdidas de propagación, que dependen de la distancia, d , existente entre transmisor y receptor.

La potencia de la señal transmitido por la antena es 20 W, con la ganancia de antena 18 dBi. Utilizando el modelo de propagación COST-231, podemos obtener la potencia recibida $Pr(\text{dBm})$ para distintas distancias de medición, considerando la pérdida de cable es 2 dB. Como hemos explicado, la teoría de medición de potencias recibidas se mide con señales de todas las portadoras, y RSRP se mide sobre las potencias recibidas de los REs que transportan la Reference Signal, y por lo tanto, RSRP es igual a la $Pr(\text{dBm}) - 23\text{dBm}$.

Distancia (Km)	Lcost (dB)	Pr (dBm)	RSRP = Pr – 23 dBm
0.5	132.46	-73.46	-96.46
0.83	140.2	-81.2	-104.2
1	143.07	-84.07	-107.07
1.24	146.36	-87.36	-110.36
1.6	150.26	-91.26	-114.26
2	153.67	-94.67	-117.67

Figura 39. Cálculo teórico: RSRP versus Distancia

A través de la tabla demostrada en la figura 39, observamos que al aumentar la distancia, aumenta las pérdidas de camino, y la RSRP disminuye, este cálculo teórico demuestra que a la distancia de 1.24 Km entre la estación base y la situación de UE, la RSRP llega a -110 dBm. Respecto al objetivo del proyecto, si RSRP están debajo de -110 dBm, tienen una mala recepción de cobertura.

Para poder tomar esta medida, el terminal debe estar sincronizado con la celda objetivo. Para cumplir este objetivo de RSRP, hay que tener como mínimo un 95% de la media ponderada en el área de servicio de LTE que se ha diseñado. Este criterio del 95% se basa en una ponderación de la distribución de tráfico. La mayoría del 5% se presenta en la parte lejana del clúster, también por la zona donde puede encontrar obstáculos o interferencias externas.

Realizamos un recorrido de la ruta presentandola en el mapa (Figura 40) e indicando los puntos de medida que corresponde a los valores teóricos que hemos obtenido. Se inicia en el punto A, donde se sitúa el clúster, y los otros puntos donde hemos hecho el calculo de la señal RSRP, obtenemos la gráfica que aparece en la Figura 41, representado por RSRP versus la distancia.

Nuestro objetivo del proyecto consiste en desplegar una red LTE, y por lo tanto hacer el diseño efectivo de procedimientos de control de potencia y de coordinación y mitigación de interferencias, con el fin de obtener el radio de cobertura para los despliegues de celda.

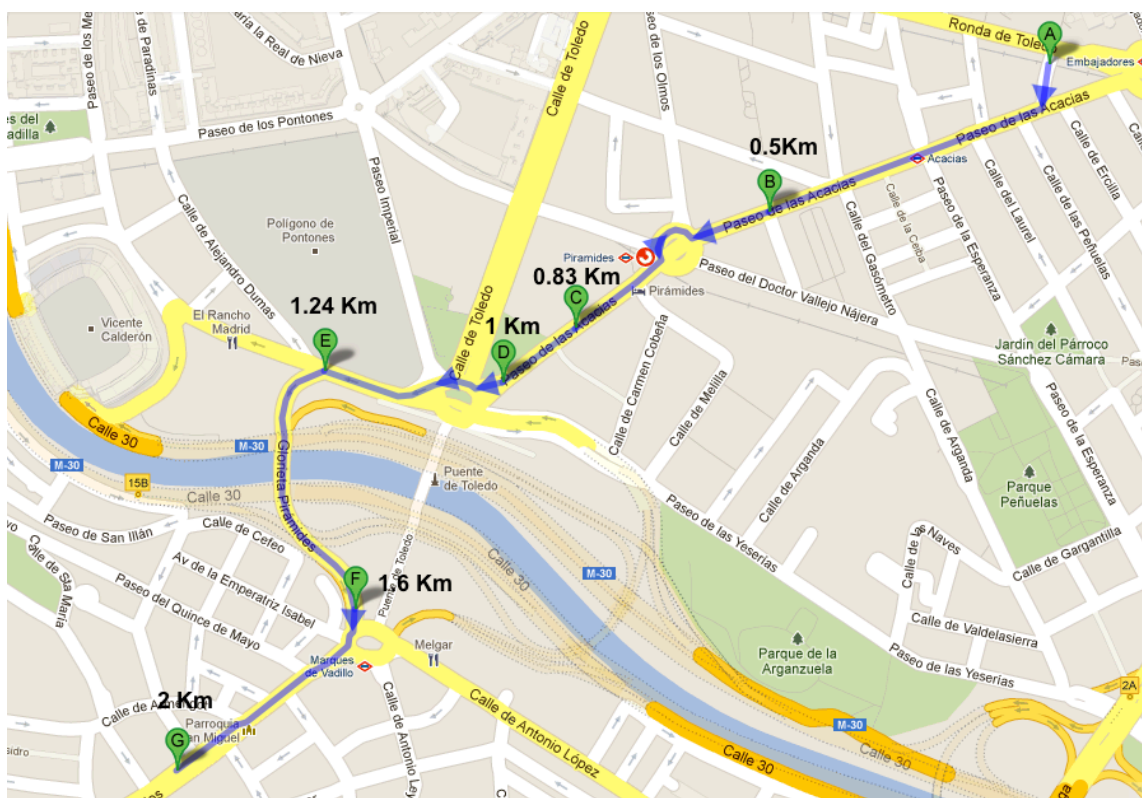


Figura 40. Ruta de medida del clúster determinado

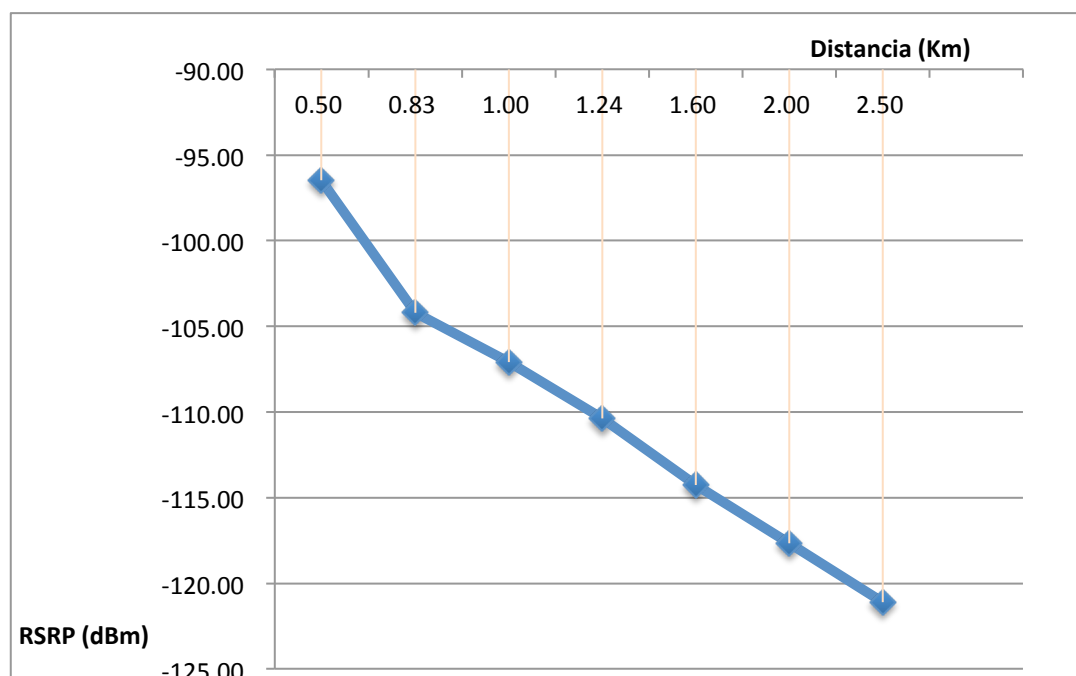


Figura 41. Gráfica de RSRP versus Distancia

Interferencias intercelular

En rasgos generales, el ancho de banda total se divide en subportadoras OFDM ortogonales, separadas entre sí Δf Hz. De todas estas subportadoras, sólo N_{usado} transmiten potencia, dejando subportadoras libres a ambos lados de ancho de banda (Bandas de guarda) para limitar las interferencias en canales adyacentes. Con todo esto, el espectro de una señal OFDM puede esquematizarse como la siguiente figura:

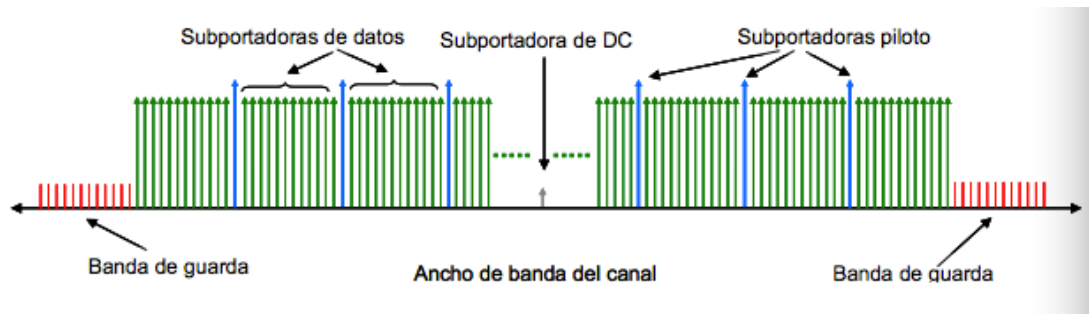


Figura 42. Espectro de la señal OFDM

Como se ha comentado en el apartado 4.4, a partir de la unidad temporal más básica, el símbolo OFDM está formada por tramas de duración de 10ms, cada una de las cuales está compuesta por 10 subtramas de 1ms. A su vez, cada subtrama se divide en 2 slot de 7 o 6 símbolos OFDM según el tamaño de prefijo cíclico. Por ello, se suele apostar por definir bloques de recursos radio (RB: Resource Block). El RB está compuesto de N_{SC} subportadoras durante N_s símbolos OFDM consecutivos de una subtrama. Un RB es la unidad mínima de asignación en el sistema, es decir, que un usuario no puede recibir menos subportadoras que las $N_{SC} \times N_s$ que componen un RB.

En definitiva, la estructura MAC está diseñada para favorecer una planificación rápida de paquetes en tiempo y frecuencia, sin embargo, el comportamiento de los sistemas OFDMA depende fuertemente de los algoritmos de asignación de recursos, siendo los principales aspectos de diseño de estos algoritmos la eficiencia espectral, la garantía de QoS y el reparto equitativo entre los usuarios. Dentro de cada celda, la planificación ortogonal de recursos a los distintos usuarios evita la interferencia intracelular, pero para poder maximizar el uso del espectro disponible en despliegues multicelulares, se debe realizar un despliegue con un factor de reutilización de frecuencias igual a la unidad que supone un aumento en la capacidad de las potencias debido a la disponibilidad de un mayor ancho de banda, donde todos los RBs estarán disponibles en todos los eNBs, maximizando la capacidad de las potencias por celda. No obstante con este

despliegue la interferencia intercelular podría llegar a ser muy elevada, especialmente entre celdas adyacentes y para usuarios alejados del eNB. Ante esta situación, LTE define una función de gestión de recursos radio denominada InterCell Interference Coordination (ICIC), cuya misión es controlar de forma dinámica, durante la operación del sistema, la interferencia intercelular.

La ICI degrada severamente el rendimiento de los usuarios, especialmente el de los usuarios situados en los bordes de las celdas, debido a los bajos niveles de SINR.

Problemas de la gestión de interferencias

Los mecanismos de control de interferencias pueden clasificarse en tres grandes grupos: mitigación de interferencias, cancelación de interferencias y coordinación de interferencias. Debido a que los mecanismos de mitigación de interferencias aportan una ganancia reducida y a que las técnicas de cancelación de interferencias son costosas computacionalmente, nos centraremos en el método de coordinación de interferencias.

La interfaz radio LTE es relativamente independiente de la banda de despliegue y en principio se puede desplegar en las bandas ya identificadas para IMT-2000 como en otras nuevas bandas que puedan aparecer en el futuro. Todas las bandas ya identificadas para LTE como futuras bandas pueden estar emparejadas (para despliegues FDD: Duplexación por División en Frecuencia) o no emparejadas (para despliegue TDD: Duplexado por División en Tiempo). La siguiente tabla muestra las bandas de operación que se han identificado hasta el momento para LTE.

Banda LTE	Banda para UL		Banda para DL		Tipo de Duplexado
1	1920 MHz	– 1980 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	– 1910 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	– 1785 MHz	1805 MHz	– 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	– 1755 MHz	2110 MHz	– 2155 MHz	FDD
5	824 MHz	– 849 MHz	869 MHz	– 894 MHz	FDD
6	830 MHz	– 840 MHz	875 MHz	– 885 MHz	FDD
7	2500 MHz	– 2570 MHz	2620 MHz	– 2690 MHz	FDD
8	880 MHz	– 915 MHz	925 MHz	– 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	– 1784.9 MHz	1844.9 MHz	– 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	– 1770 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	– 1452.9 MHz	1475.9 MHz	– 1500.9 MHz	FDD
12	698 MHz	– 716 MHz	728 MHz	– 746 MHz	FDD
13	777 MHz	– 787 MHz	746 MHz	– 756 MHz	FDD
14	788 MHz	– 798 MHz	758 MHz	– 768 MHz	FDD
17	704 MHz	– 716 MHz	734 MHz	– 746 MHz	FDD
33	1900 MHz	– 1920 MHz	1900 MHz	– 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	– 2025 MHz	2010 MHz	– 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	– 1910 MHz	1850 MHz	– 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	– 1990 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	– 1930 MHz	1910 MHz	– 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	– 2620 MHz	2570 MHz	– 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	– 1920 MHz	1880 MHz	– 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	– 2400 MHz	2300 MHz	– 2400 MHz	TDD

Figura 43. Bandas mejor identificadas para el despliegue de LTE en la Release

Debido a las características de OFDMA, la macrocelda es interferida por las macroceldas vecinas. Las estrategias que se plantea para la planificación de frecuencias en LTE, que están pensada para distribuciones homogéneas del tráfico en el área de cobertura. Algunas de estas estrategias están basadas en las técnicas de la reutilización de frecuencias.

La técnica más usada para minimizar las interferencias es FFR (Fractional Frequency Reuse), es una solución para reducir la interferencia en sistemas macrocelulares, especialmente para los usuarios del borde de la celda.

FFR es una técnica de coordinación de interferencias que ha ganado gran relevancia en el contexto de redes celulares basadas en OFDMA. Al principio del esquema FFR se divide el ancho de banda del sistema en dos zonas, una zona para los usuarios situados en el interior de la celda y otra para los situados en el exterior. Las celdas adyacentes emplean diferentes sub-bandas para los usuarios situados en su zona exterior, reduciendo así el nivel de ICI en esa zona.

En la Figura 44 se puede observar el reparto de recursos para el esquema denominado Partial FFR. En este caso, los usuarios del interior de la celda utilizan la misma sub-banda de frecuencias en todas las celdas, mientras que

la sub-banda exterior se divide en tres sub-bandas, de forma que cada celda utiliza una sub-banda ortogonal a sus vecinas. En este caso, el interior de la celda no comparte recursos con el exterior de las celdas vecinas, lo que reduce la interferencia.

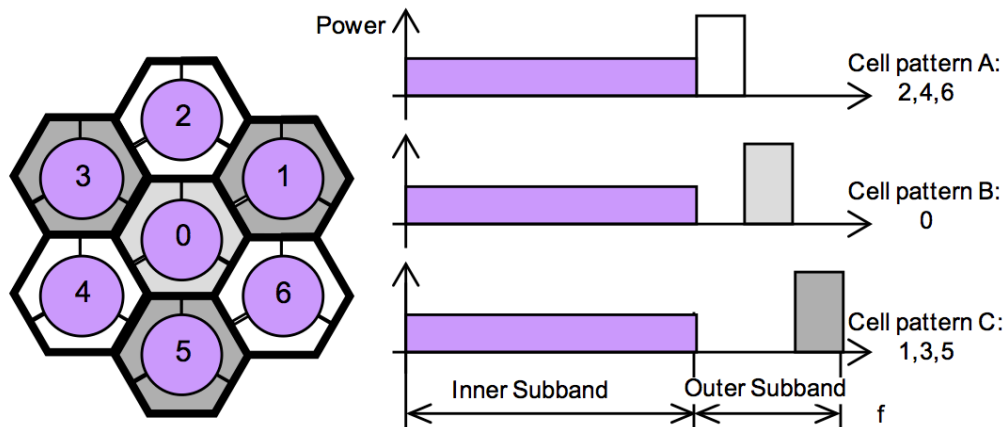


Figura 44. Partial FFR

Para aumentar la flexibilidad y eficiencia, en el esquema Soft FFR ilustrado en la Figura 45, todo el ancho de banda es accesible en cada una de las celdas gracias al ajuste de potencia, pero eso implica una mayor ICI.

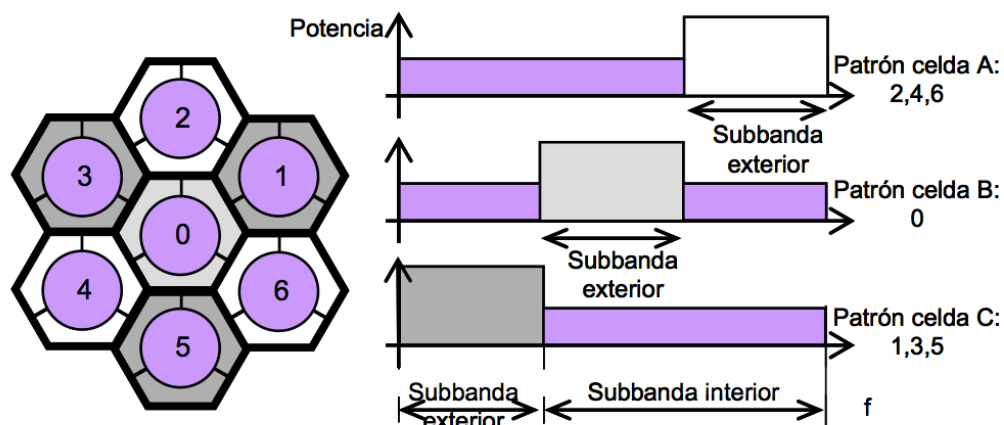


Figura 45. Soft FFR

Sabiendo las desventajas de los dos modelos de la técnica de control de interferencia, tenemos otra opción de combinarlos en uno, ya que nuestro despliegue de red es tres veces sectorizada, y por lo tanto, combinamos el esquema de la reutilización de frecuencias fraccional de los dos modelos que hemos comentado anteriormente con la sectorización de frecuencias. La sectorización de frecuencias consiste en dividir el ancho de banda disponible en tantas sub-bandas como sectores tiene la celda y cada sector asigna exclusivamente los recursos de una de estas sub-bandas, entonces, cada celda tiene tres sectores y el reparto de recursos de frecuencias entre los diferentes sectores queda como aparece en la Figura 46, la sub-banda para la parte exterior un $\frac{1}{3}$ del ancho de banda total.

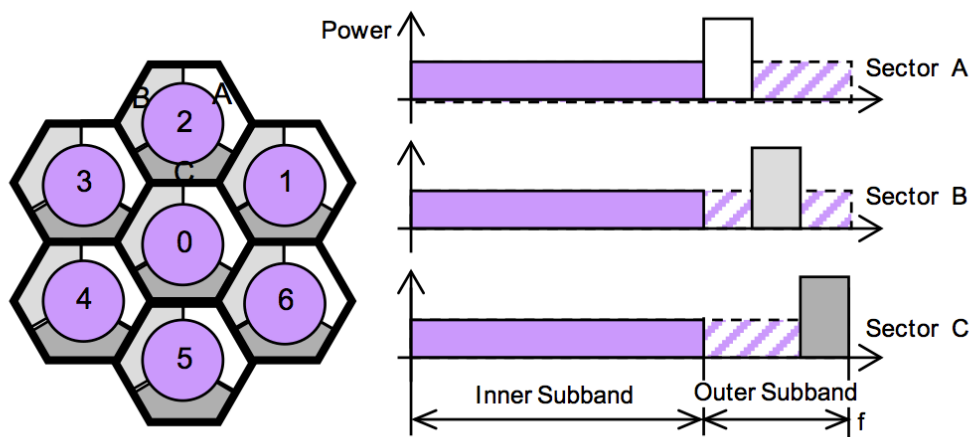


Figura 46. FFR con sectorización en la sub-banda exterior.

De esta forma, el objetivo del proyecto es desplegar una red LTE en Madrid, la cual debe proporcionar altas tasas de datos y garantizar buena calidad de servicio. De tal forma que en el clúster original están situadas en extremos opuestos y por lo tanto, incorreladas por distancia, se consideran que las celdas vecinas se interfieren las unas a las otras. La distancia entre estación base es el radio de cobertura de la celda, para obtener este parámetros, tenemos que tener en cuenta el valor de *throughput* para el caso del centro de la ciudad y el borde de la ciudad, considerando que para los dos casos, dependiendo de cantidad de usuarios, la densidad de despliegue son diferentes para ambos caso.

Throughput

En LTE, la mínima estructura de modulación es el Resource Element (RE). Un RE es una subportadora de $\Delta f = 15$ KHz por cada símbolo. Los REs conforman un Resource Block (RB), un RB está dimensionado entre subportadoras y símbolos. En general, un RB lo conforma 12 subportadoras, resultante en $12\Delta f = 180$ KHz, constituyendo cada uno de estos bloques un recurso en el dominio de frecuencias y 6 o 7 símbolos (según el tamaño de prefijo cíclico) en el dominio del tiempo. A partir de aquí, el número total de subportadoras ocupadas por una portadora LTE en el enlace descendente es de $N_S = 12N_B + 1$, siendo N_B el número de bloques de 12 subportadoras utilizados. También podemos fijar en la siguiente tabla, para BW = 20 MHz, ocupa 1201 portadoras.

La siguiente tabla (Figura 47) demuestra los parámetros de la capa física, a través de ello, podemos calcular la velocidad de transmisión (throughput) de sentido DL.

Transmission BW	1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Sub-frame duration	0.5 ms					
Sub-carrier spacing	15 kHz					
Sampling frequency	1.92 MHz (1/2 x 3.84 MHz)	3.84 MHz	7.68 MHz (2 x 3.84 MHz)	15.36 MHz (4 x 3.84 MHz)	23.04 MHz (6 x 3.84 MHz)	30.72 MHz (8 x 3.84 MHz)
FFT size	128	256	512	1024	1536	2048
Number of occupied sub-carriers	76	151	301	601	901	1201
Number of OFDM symbols per sub-frame (Short/ Long CP)	7/6					

Figura 47. Parámetros de la capa física para el sentido DL para distintas canalizaciones.

$$Throughput = \frac{1201 \text{ portadoras} * \frac{6 \text{ bits}}{\text{símbolo}} * \frac{7 \text{ símbolos}}{T_s}}{\frac{0.5 \text{ ms}}{T_s}} = 100.88 \text{ Mbps} \quad (6.3)$$

De misma manera, tomando en consideración el número de radio-bloques indicados en la tabla de la Figura 48, podemos obtener las velocidades globales para las distintas canalizaciones utilizando la ecuación 6.3:

Canalización	1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Throughput (Mbps)	6.38	12.68	25.28	50.48	75.68	100.88

Figura 48. Throughput para diferentes canales

Throughput de borde de la ciudad

En los experimentos, el valor máximo de throughput que ha obtenido a través del Drive Test es 99.6 Mbps cuando el UE situado en la distancia de 425 metros de la estación.

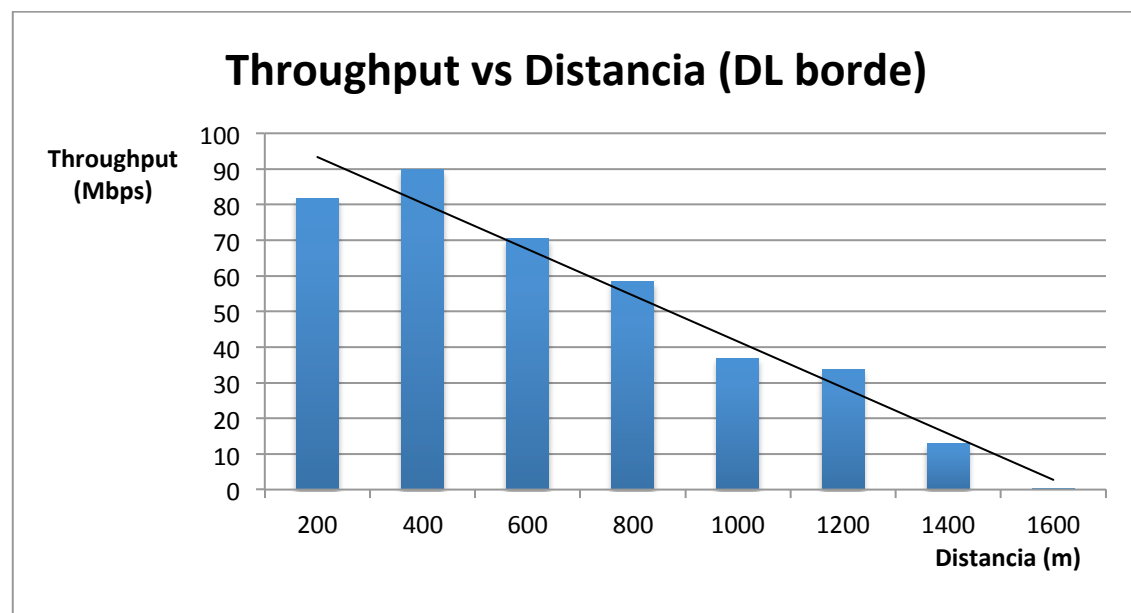


Figura 49. Throughput al borde de la ciudad (DL) vs Distancia

Suponemos que para tener un mínimo servicio, el throughput es igual a 20 Mbps, la distancia R para este peor caso es 1.24 Km presentado en la Figura 49. Ahora nos fijamos en la Figura 50, R que hemos obtenido anteriormente es la distancia de clúster a borde del celular, es igual al doble del radio celular

r , entonces podemos decir que el radio de hexágono r es $1.24/2=0.62$ Km. En el sistema tri-sectorial, (Figura 50) la interferencia co-canal por la utilización de misma frecuencia afectada por el próximo eBN en el peor caso, la distancia al borde del celular R_i es 5 veces el radio celular r , es decir $5 \times 0.62 = 3.1$ Km. Y por lo tanto, la distancia entre el despliegue de estaciones es 3.1 Km para el caso del borde de la ciudad.

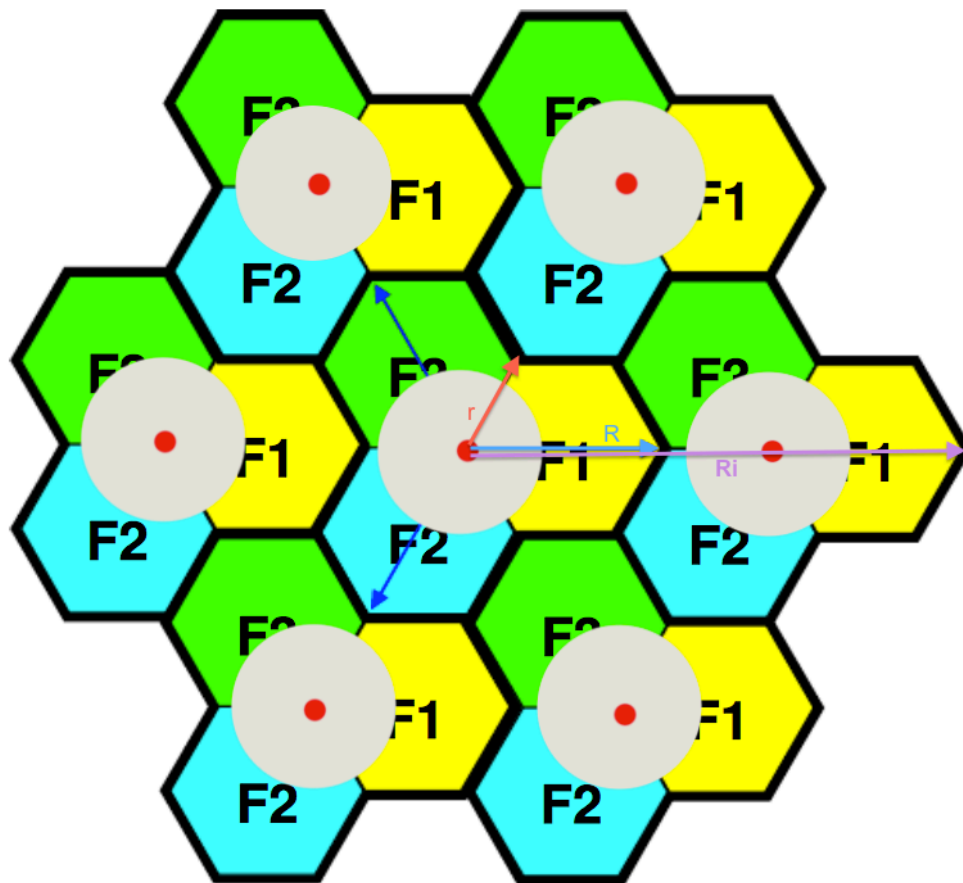


Figura 50. Sistema tri-sectorial

En la Figura 51, podemos ver la ruta de recorrido del Drive Test, la zona de rojo presenta un bajo valor de throughput, y la zona de verde tiene un valor de throughput elevado.

En el punto C mostrado en la figura 51, es donde llega el mínimo throughput para tener servicio, a partir de allí, se va entrando a la zona de servicio de otro celular.



Figura 51. Recorrido de DT para medir el throughput

Throughput en el centro de la ciudad

Debido a la densidad de usuarios, el despliegue de la red LTE en el centro de la ciudad requiere un mayor número de clústers y la distancia entre ellos se disminuye. Observamos en la siguiente figura, que a partir de la distancia de 800 metros, el valor de throughput va decayendo rápidamente. Para el throughput igual a 20 Mbps, la distancia R es 833 metros en peor caso, es decir, el radio de celular r es $0.83/2=0.41$ Km. De igual manera, la distancia entre las estaciones interferidas en el peor caso la calculamos como $R_I=5 \times 0.41= 2.05$ Km en el caso del centro de ciudad.

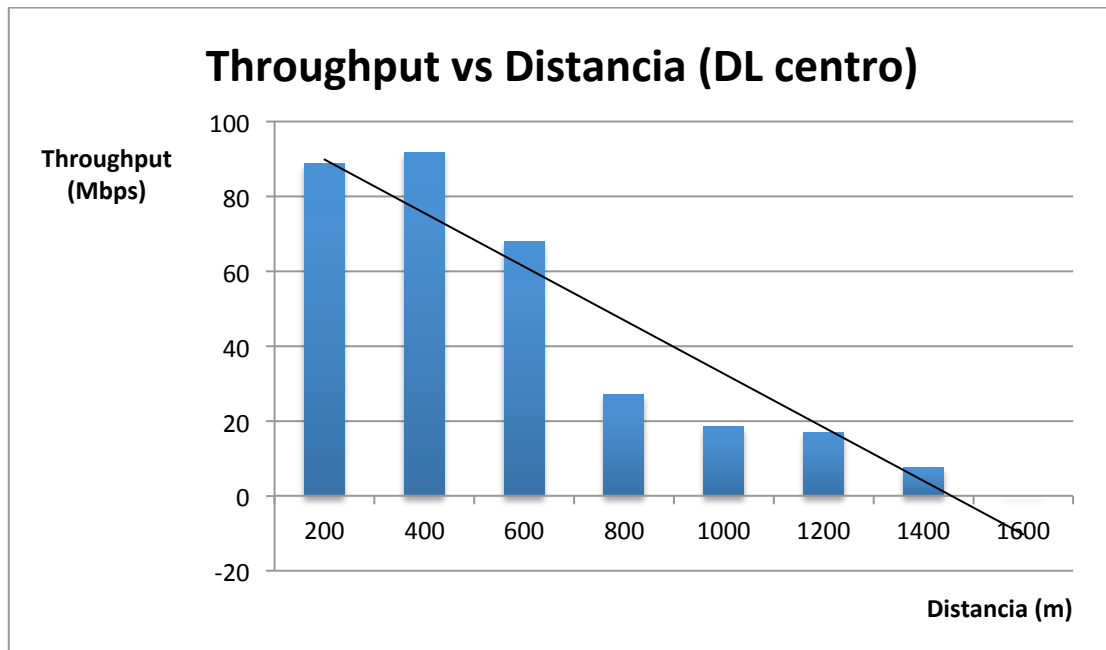


Figura 52. Throughput de centro de la ciudad versus Distancia

En el caso del centro, el número de usuarios por canal es elevado, entonces el radio de cobertura será menor, en la Figura 53, el punto A es donde se sitúa el clúster, y el punto B es donde llega el mínimo throughput para mantener el servicio.

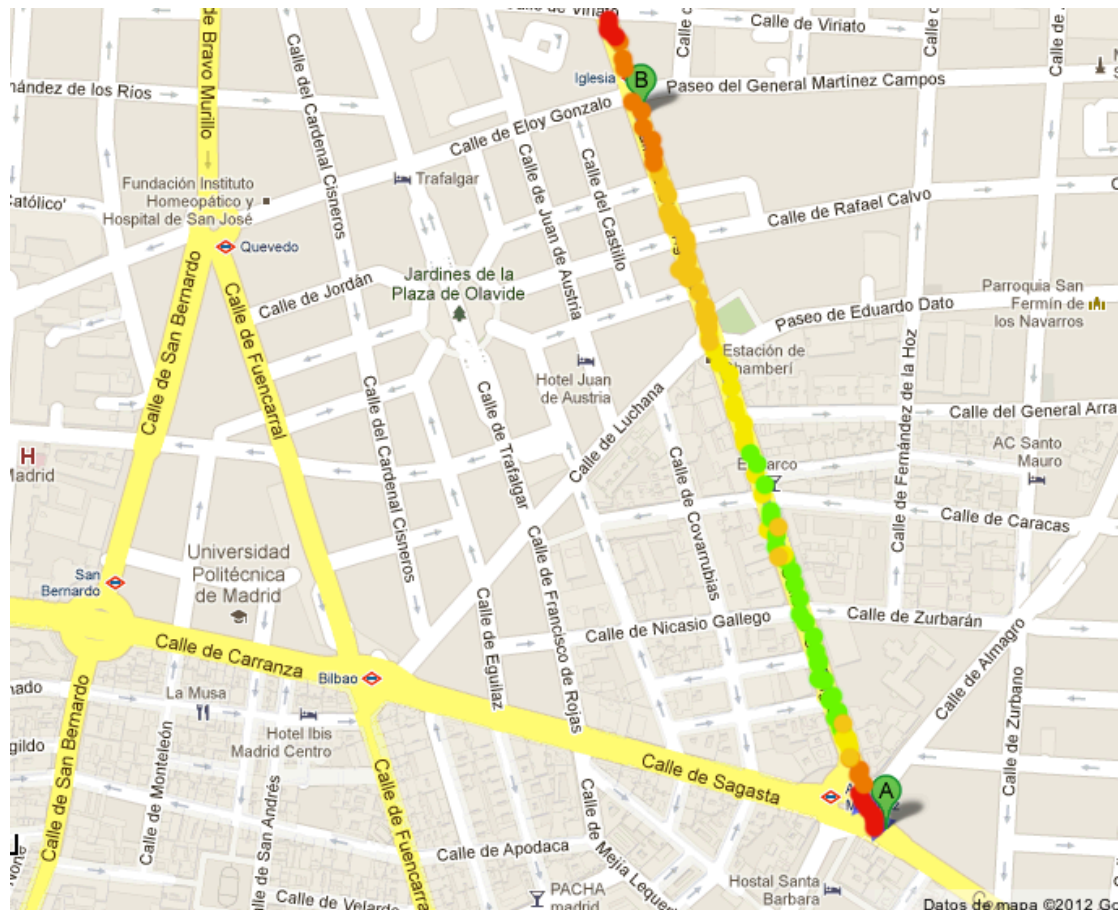


Figura 53. Presentación del throughput en una ruta en el centro de la ciudad

SINR

A continuación de la teoría de la interferencia intercelular, y a partir del cálculo de throughput, obtenemos el radio de cobertura para ambos casos, la función de SINR la podemos obtener de la siguiente manera:

$$SINR = S - I - N \quad (6.4)$$

$$S = P_r + \sum G - \sum L - L(d) \quad (6.5)$$

$$I = P_r + \sum G - \sum L - L(d_i) \quad (6.6)$$

donde S es la señal de referencia, I es la interferencia, y N es el ruido de ambiente.

Suponemos que el ruido N es apreciable, es decir, $N=0$, entonces, obtenemos la SINR:

$$SINR = S - I = L(d_I) - L(d) \quad (6.7)$$

Para el caso del centro de la ciudad, $d = 0.83Km$ y $d_I = 2Km$

$$SINR = 13.45 \text{ dB}$$

Para el caso del borde de la ciudad, $d = 1.24Km$ y $d_I = 3.1Km$

$$SINR = 14 \text{ dB}$$

6.3 Comparación valores experimentales y teóricos

En la Figura 54, la comparación de RSRP entre los valores experimentales del drive test y los valores teóricos calculados por el modelo de propagación COST-231. Vemos que casi se coinciden todos los puntos de medida, para el peor caso de RSRP = -110 dB, en el drive test, tenemos en el punto de 1.25 Km desde el clúster, y en el calculo teórico, tenemos la distancia igual a 1.24Km.

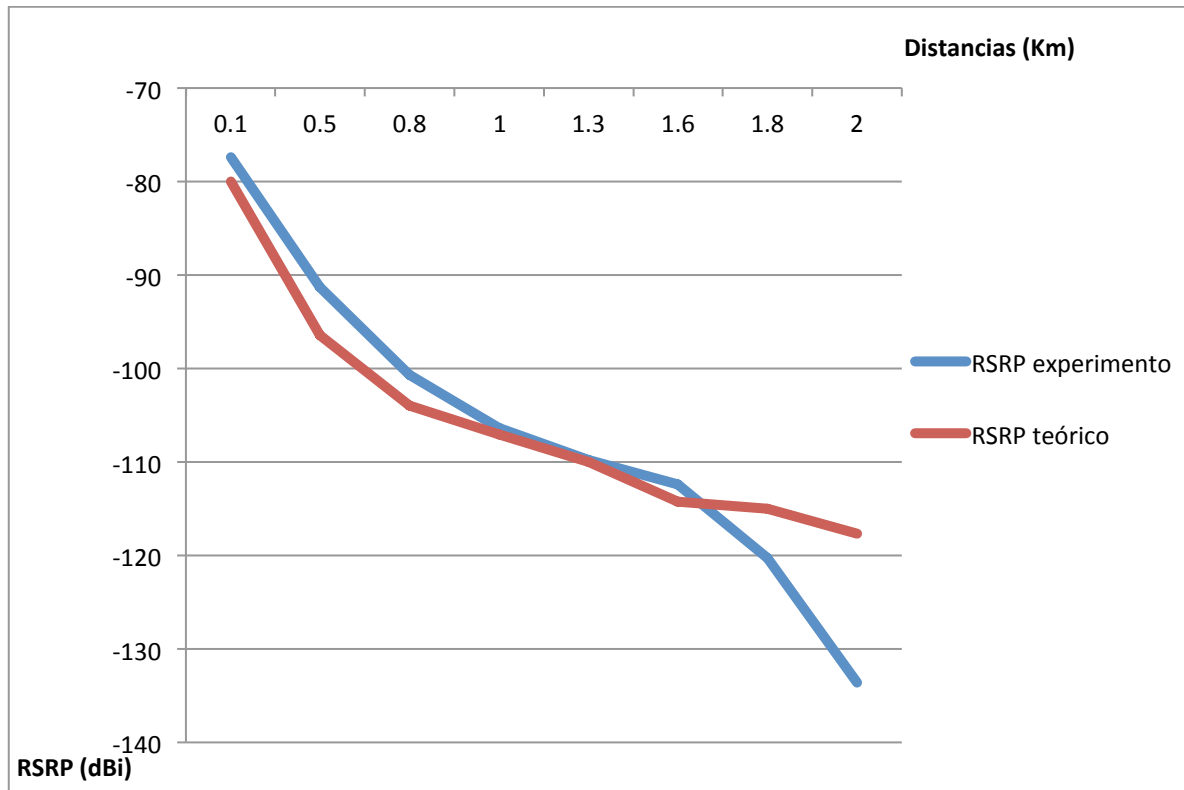


Figura 54. Comparación RSRP experimentos y RSRP teóricos

Observamos en la Figura 55, la comparación de SINR entre los valores experimentales y los valores teóricos a partir del cálculo, en el caso de cálculo teórico se presenta en tanto para el caso del centro de la ciudad como para el caso del borde de la ciudad. A través de la figura podemos ver que la línea que presenta el valor experimental está por debajo de las líneas de valores teóricos, este problema causado por la despreciación del ruido de ambiente a la hora de hacer los cálculos.

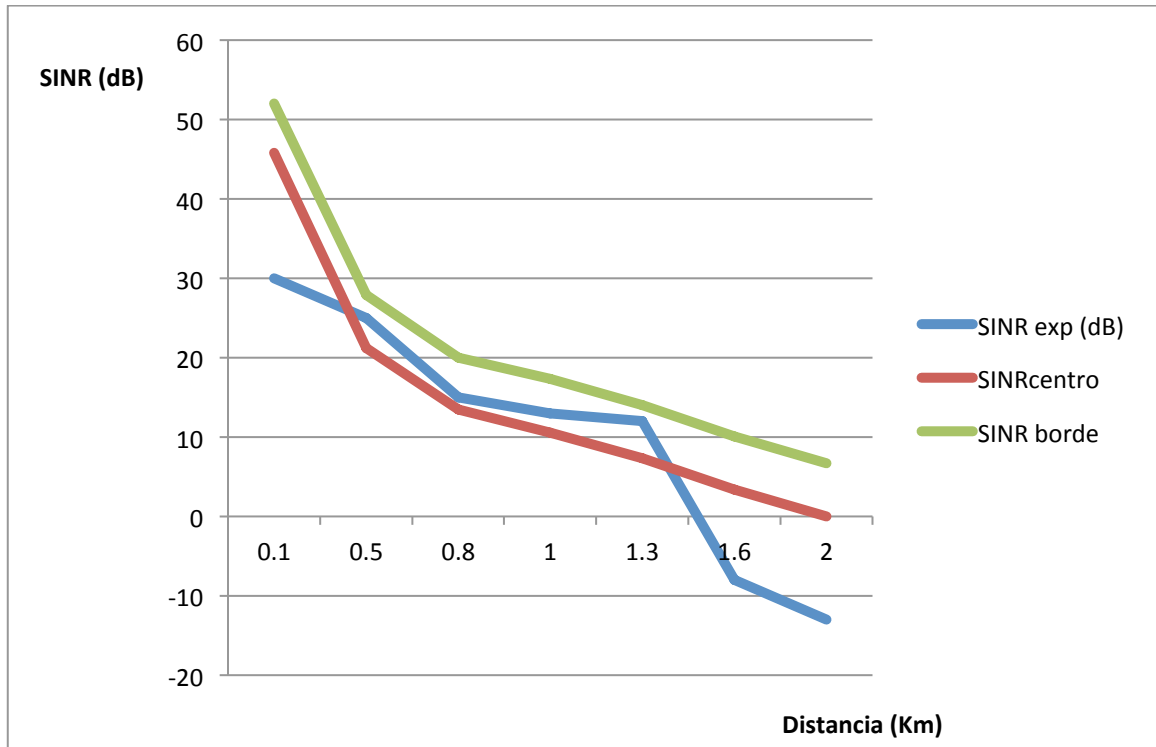


Figura 55. Comparación SINR experimentos y SINR teóricos

6.4 Diseño de red

Con el fin de proporcionar el primer posicionamiento de la red LTE, desde la perspectiva del usuario, que se contrata el acceso a una serie de servicios, con capacidad de movilidad y sobre cierta extensión geográfica, al realizar un ejercicio dimensionado de red con el fin de satisfacer la demanda agregado del conjunto de usuarios del sistema, a modo ilustrativo, estudia los parámetros que proporciona una buena QoS, que se ha realizado en el apartado 6.3, dado como una conclusión de parámetros obtenidos a partir de los cálculos teóricos para la simulación del despliegue de la red LTE en Madrid, tanto para el caso del centro de la ciudad como para el caso del borde de la ciudad.

Por la cuestión de planificaciones de usuarios, el radio de cobertura de la red para el caso de centro de la ciudad es distinto que en el caso de borde de la ciudad.

Considérese una densidad de usuarios U [usuarios/Km²], cada uno de ellos generando en términos medios un tráfico T [bits/s/usuario]. Para satisfacer esta demanda, considérese que el operador tiene asignado a una estación base dada un ancho de banda B [Hz], que pretende explorar mediante una tecnología caracterizada por una cierta eficiencia espectral E [bits/s/Hz].

Considérese que una estación base tiene capacidad para cubrir una superficie $S [Km^2]$. Así, la capacidad desplegada por el operador es $B \times E / S [bits/s/Km^2]$. El dimensionado adecuado corresponde al caso en que la capacidad desplegada por el operador permite cubrir la demanda de tráfico de los usuarios, esto es, cuando $B \times E / S = U \times T$.

A partir de la igualdad anterior, se desprende que el aumento de la demanda requiere una condición para satisfacer dicha demanda. Esto es:

- Aumentando B , accediendo a una mayor cantidad de espectro radioeléctrico.
- Aumentando E , utilizando una tecnología espectralmente más eficiente.
- Reduciendo S , desplegando una mayor número de estaciones base para reducir la superficie cubierta por cada una de ellas.

Y por lo tanto, el diseño de la red para cumplir las condiciones de QoS, lo que vamos hacer es reducir la superficie de la cobertura para el centro de la ciudad, es decir, una menor distancia entre las estaciones base. Con esta base, las condiciones que hemos tomado para la despliegue presentan en la Figura 56 y Figura 57.

Centro de la ciudad (Radio de cobertura 0.8 Km)			
Distancia (Km)	Throughput DL(Mbps)	SINR (dBi)	Modulación
0.1	72	45.8	64 QAM
0.5	82	21.2	64 QAM
0.8	22	13.5	64 QAM
1	15	10.6	QPSK
1.5	5	4.4	QPSK

Figura 56. Parámetros de QoS calculados para el centro de la ciudad

Borde de la ciudad (Radio de cobertura 1.24 Km)			
Distancia (Km)	Throughput DL(Mbps)	SINR	Modulación
0.1	98	52	64 QAM
0.5	87	28	64 QAM
1	45	17.3	64 QAM
1.24	21	14	64 QAM
1.5	10	11	QPSK

Figura 57. Parámetros de QoS calculados para el borde de la ciudad

Respecto al radio cobertura calculado anteriormente (en el centro, $R=0.83$ Km, en el borde, $R=1.24$ Km), como hemos explicado en el apartado 6.3, el radio de las células para el caso del centro de la ciudad es $0.83/2=0.4$ Km, y para el caso del borde de la ciudad es $1.24/2=0.62$ Km.

Observe en la Figura 58, consideramos que el centro de ciudad pertenece dentro de la carretera M30, y fuera de la M30 se considera como el borde de la ciudad.

Por la cuestión económica, actualmente no desplegamos la red LTE para los municipios de la zona norte y zona sur del Madrid. Si la simulación resultará eficiente, se podría expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base.

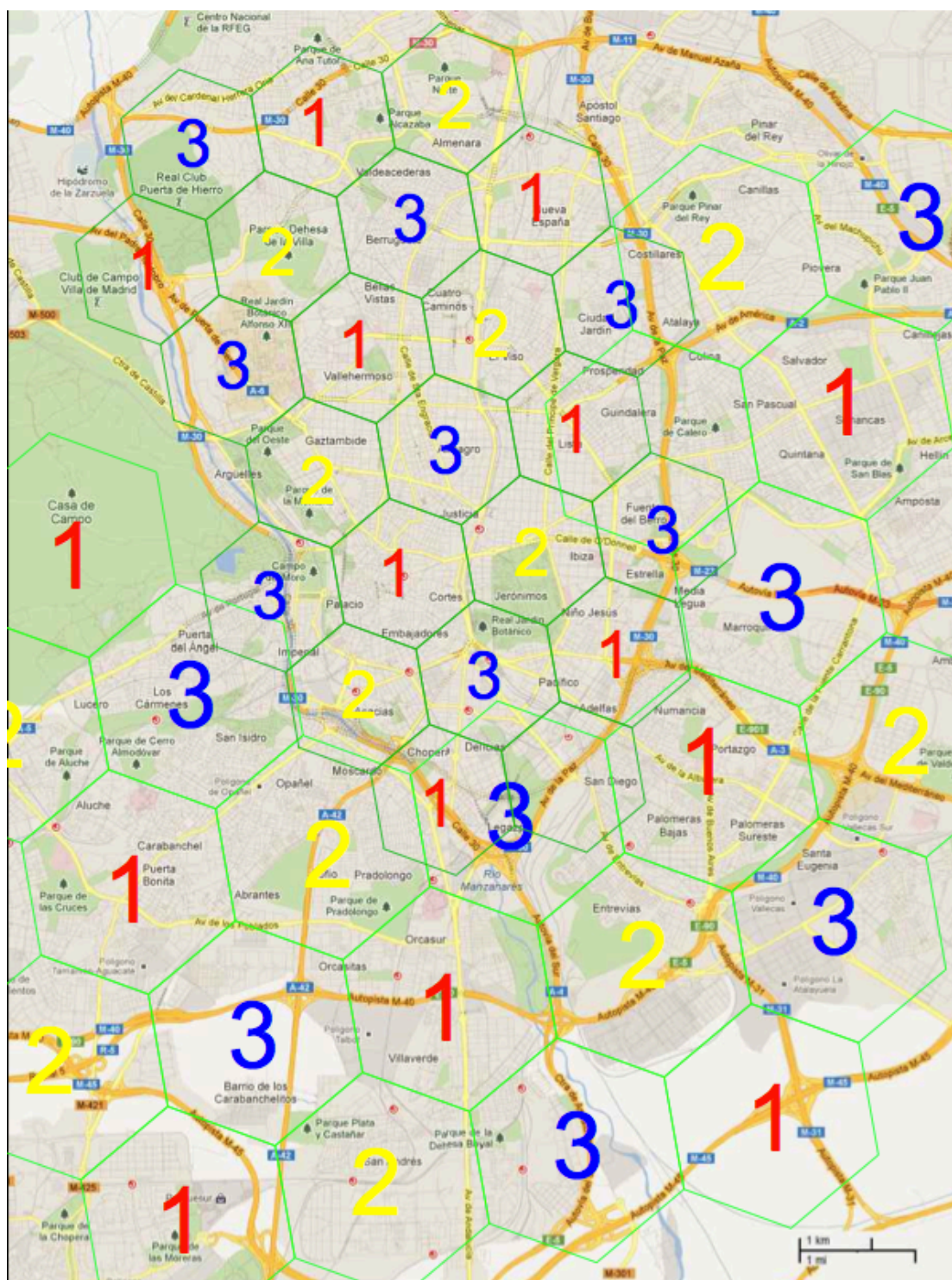


Figura 58. Despliegue de red celular LTE en Madrid

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 Conclusiones

El objetivo de este proyecto fin de carrera ha sido estudiar, desarrollar y evaluar estrategias de gestión de recursos radio para el despliegue de red LTE. Como ya se ha comentado, el estudio se ha centrado en el enlace descendente asumiendo que el duplexado es FDD. Con el fin de evaluar las diferentes estrategias propuestas se ha llevado a cabo una simulación, la cual se ha valorado y analizado en el apartado de cálculos.

El despliegue de una red LTE en la ciudad Madrid presenta una serie de dificultades en cuanto a la ubicación de las estaciones bases, en primer lugar, la inversión que se tiene que hacer es alta, pero las ganancias y la experiencia que se le puede brindar al usuario son también elevadas, y que como ya cuenta con un despliegue de redes 3G se reduce el coste de inversión. En la evaluación económica realizada, los costes de los equipos LTE han sido estimados por profesionales basándose en un ligero incremento del actual equipamiento 3G. Esto es debido a que no se tiene mayor información al respecto ni por parte de las operadoras ni por los proveedores. Lo que se recomienda es hacer un análisis mucho más real del que se ha realizado con costes aplicados en una red comercial ya desplegada masivamente, red que por el momento aún no existe.

Concretamente se ha implementado dos tipos diferentes de despliegues. En primer lugar se ha llevado a cabo un escenario en el que se despliegue una red celular con radio de 0.4 Km para el centro de la ciudad, por el elevado número de usuarios. En segundo lugar, se ha desarrollado un escenario que consiste en desplegar una red con radio de 0.62 Km para el borde de la ciudad. De la misma forma que para el despliegue anterior se han llevado a cabo pruebas colgando la rejilla de 3x3 en diferentes posiciones.

Por otra parte, se describen un conjunto de funciones y mecanismos encaminados a permitir un máximo aprovechamiento de los recursos espectrales, limitados por naturaleza, de manera que garantice un determinado valor de los parámetros de calidad de servicio o QoS establecidos. En cuanto se supere la prueba, la red LTE será la revolución 4G en la ciudad Madrid.

La evolución técnica de los sistemas móviles evoluciona a conseguir que soporten simultáneamente mayores tasas binarias y mayor movilidad.

7.2 Líneas futuras

En este trabajo no se han considerado esquemas de selección de nodo de acceso, por lo que una futura líneas de trabajo sería permitir el libre movimiento de los usuarios, de tal forma que los usuarios escogiesen a que nodo conectarse en función de alguna métrica concreta como por ejemplo en función de la potencia recibida de las señales de referencia (RSRP). Hay que tener en cuenta también los conflictos de interferencias se producen fundamentalmente con las celdas más próximas que utilizan la misma frecuencia. Ligado a esto y dotando de mayor flexibilidad y realismo al problema, el siguiente paso sería proponer estrategias que den soporte a condiciones cambiantes, y la mejor planificación y reutilización de frecuencias para obtener una red eficiente.

Según lo comentado anteriormente, el operador de red móvil puede expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base, la disponibilidad de mayor cantidad de espectro o el uso de una tecnología más avanzada. La variable preferida a atacar dependerá tanto la viabilidad y flexibilidad que ofrezcan cada una de ellas así como de consideraciones económicas al respecto de las mismas. Por ejemplo, como explotar una nueva tecnología sobre las bandas que ya tuviera asignadas, siempre que la regulación lo permitiera.

8 PRESUPUESTO

El principal objetivo de dicho proyecto es el despliegue de la red LTE en determinadas zonas en las principales ciudades de España, con la intención de obtener una mejor calidad de servicio para la red de cuarta generación en estas zonas determinadas.

A lo largo del proyecto que hemos estudiado, por un parte contamos con la inviabilidad económica, entre los costes de inversión están el coste de los equipos LTE así como los equipos del sistema radiante, la infraestructura, los terminales y los permisos municipales. En muchos casos la operadora es contraria a un gran desembolso económico para la instalación de un eNB, porque pasarán muchos años hasta obtener beneficios y no siempre la mejor localización para los planificadores de radio y transmisión es la localización más económica. Por ello, cuando hacemos la prueba de dicho proyecto y para evitar gastos innecesarios, la operadora ha instalado unos equipos en las zonas específicas para la prueba, y a través del hardware y software podemos obtener un resultado más aproximado a la realidad.

Para el análisis del presupuesto de dicho proyecto, se han considerado los siguientes elementos con los respectivos precios.

	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total
Equipos LTE y sistema radiante			
Estación base eNodeB (HW y SW)	15	70,000.00	1,050,000.00
Antenas	90	1,200.00	108,000.00
Radio Enlace	15	28,000.00	420,000.00
Infraestructura			
Sistema de protección contra rayos	15	500.00	7,500.00
Sistema de puesta a tierra	15	1,400.00	21,000.00
Torres	15	2,800.00	42,000.00
Instalación de los equipos	15	3,000.00	45,000.00
Adquisición del site y obras civiles	15	25,000.00	375,000.00
Terminales			
USB dongles LTE	3750	120.00	450,000.00
Equipos móviles LTE	3750	300.00	1,125,000.00
Otros			
Permisos municipales y licencias	15	5,000.00	75,000.00
Margen de error	5%		185,925.00
Total			3,904,425.00

Figura 59. Coste de implementación LTE

El coste de las estaciones base eNodeB están calculando con las estaciones de 3G incrementando en un 25% aproximadamente. LTE utiliza la configuración 2x2 MIMO, son dos antenas por cada sector, y al ser tres sectores por estación base, en total necesitan $6 \times 15 = 90$ antenas.

En efecto, mientras que el incremento del tráfico de voz supone un incremento de los ingresos del operador al facturarse por establecimiento de llamada y tiempo de ocupación de los recursos del sistema, en el caso del tráfico de datos se produce un desacople entre ambos, asociado a la adopción de tarifas planas. Por otra parte, tal y como se ilustra en la Figura 59, el coste de despliegue y operación de las redes de comunicaciones móviles con la tecnología actual guarda cierta proporcionalidad con el volumen de tráfico a cursar si se pretende ofrecer una QoS adecuada, de manera que para preservar un cierto margen de beneficio es necesario

reducir diferentes componentes de la estructura de costes, lo que constituye una de las principales motivaciones para el desarrollo de un sistema LTE.

9 BIBLIOGRAFÍA

[1] Wireless Intelligence analysis

<https://wirelessintelligence.com/analysis/>

[2] Especificaciones 3GPP

<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm>

[3] Libro: “Las Telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información”, Edición: División de Relaciones Corporativas y Comunicación de Telefónica I+D, 1ª edición, febrero de 2005

[4] Libro “LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access”. Edited by: Harri Holma and Antti Toskala in 2009, both of Nokia Siemens Networks, Finland

[5] Libro “LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization” edited by: Ralf Kreher and Karsten Gaenger in 2011

[6] Comunicaciones móviles LTE

<http://www.xirio-online.com/>

[7] Documento de información: Basic Antenna Principles for Mobile Communications

Modelo: Anton-Kathrein-Straße 1 83004 Rosenheim

[8] Informe de planificación de radio para 3GPP, “Practical Introduction to LTE for Radio Planners”, J. Salo, M. Nur-Alam, K. Chang

[9] Modelos de cálculo para estimar la propagación de las ondas electromagnéticas por el espacio.

http://www.xirio-online.com/help/es/compute_method.html

[10] 3GPP serie 36 211

Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channel and modulation

<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>

[11] Technical Report “OFDM Based WLAN Systems”, edited by: Muhammad Imadur Rahman, Suvra Sekhar Das, Frank H.P. Fitzek in 18 February 2005

<http://kom.aau.dk/~ff/documents/TR041002.pdf>

[12] Especificaciones de antenas Kathrein modelo 80010675

<https://www.kathrein.de/de/mcs/produkte/download/9363879b.pdf>

[13] Plan de despliegue de telefónica móviles s.a. en el término municipal de Leganés (AÑO 2011), editado por TELEFÓNICA MÓVILES ESPAÑA, S.A.

[14] Technical report: “Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service”, Edited by: Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, K. Fukuda, Review of Elec. Commun. Lab., 16(9/10), 825-73

[15] Libro: “WCDMA for UMTS” Radio Access for 3G Mobile Communications, edited by: Harri Holma and Antti Toskala, Third Edition, in 2004

[16] Soporte Técnico de Núcleo de Red – Negocio Móvil – Telefónica España (Año 2011)

[17] 3GPP TS 36.211 V8.7.0 “Physical Channels and Modulation” Technical Specification Group Radio Access Network (2009-05), Release 8

<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>

□

[18] Libro: “3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband”, edited by: Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, Per Beming, 2nd edition. Academic Press, 2007

[19] Agilent Technologies. 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges. www.agilent.com [Online] 2009. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf>

[20] International Telecommunication Union

<https://mentor.ieee.org/802.16/documents>

[21] Huawei LTE

http://www.idia.es/c/document_library/get_file?uuid=f5ab2136-391b-4c74-8ee5-17dc78250f24&groupId=10203

[22] LTE University: aporta soluciones de trabajo, y explicación componentes de LTE

http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/p/eutran.aspx

[23] 3GPP TS 25.401 vb00 “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)” UTRAN overall description (3GPP TS 25.401 version 11.0.0 Release 11)

<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25401.htm>

